LUIS EDUARDO CAIRES

# APLICAÇÃO DE REDES INTELIGENTES NAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS RESIDENCIAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física) para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Francisco Burani

Versão Corrigida
(versão original disponível na Biblioteca da Unidade que aloja o Programa e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP)

SÃO PAULO
2012

## FICHA CATALOGRÁFICA


Caíres, Luis E.

Aplicação de redes inteligentes nas instalações elétricas residenciais. / Luis Eduardo Caires ; orientador Geraldo Francisco Burani . – São Paulo, 2012.

276 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

1. Eletrotécnica 2. Sistemas elétricos de potência 3. Automação 4. Instrumentação de medidas elétricas I. Título

# SUMÁRIO

# RESUMO

CAIRES, Luis E. **Aplicação dos sistemas inteligentes nas instalações elétricas residenciais.** 2012. 184f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

A eletricidade como recurso energético adquiriu importância vital na sociedade moderna, pois permite atender de modo relativamente simples a demanda pelos seus serviços. Dessa forma a demanda pela eletricidade aumenta proporcionalmente a evolução das populações que dela se beneficiam. O sistema elétrico que produz esse insumo está limitado em sua capacidade aos recursos disponíveis para geração, transmissão e distribuição de energia. Grosso modo esse limite é definido pela potência máxima do sistema. Essa potência máxima pode ser alcançada em determinados períodos do dia, denominados horários de ponta e em boa parte do tempo o sistema é sub aproveitado. Havendo a possibilidade de controle da demanda, seria possível empregar essa capacidade ociosa pela transferência de cargas para horários mais favoráveis. Para isso é necessário haver a ação coordenada dos muitos consumidores para obter o resultado operacional desejado. A coordenação seria então obtida através das chamadas redes inteligentes que agregam funções e automação com vários níveis de complexidade e constituem um sistema muito amplo que une a geração ao consumo. A diferença perceptível pelo consumidor residencial está no fato deste ser incluído na operação dessa rede praticamente em tempo real, ou seja, espera-se sua participação mais efetiva no sistema elétrico. Um dos meios projetados para obter esse efeito é através de incentivos tarifários, onde a variação do custo da energia motivaria o consumidor a mudar seus hábitos de consumo. Para participar desse sistema o consumidor residencial precisa adaptar suas instalações para operar de modo mais eficiente obtendo o máximo de energia com o menor custo. Não é sempre que a mudança de hábitos está no poder do consumidor, de modo que este precisa de meios para adaptar suas instalações elétricas a essa realidade. A adaptação envolve incorporar meios de armazenamento e gerenciamento de recursos energéticos a fim de que a instalação forneça os serviços energéticos no momento em que é necessário, independente do momento em que adquire os insumos necessários. Para isso é necessário, além dos meios de armazenamento de energia, um sistema autônomo de controle, posto que os consumidores residenciais não devem viver em função de suas instalações elétricas. Esse sistema autônomo seria composto por elementos automáticos derivados daqueles empregados na automação industrial nos circuitos de comandos elétricos. Dessa forma o objetivo deste trabalho é analisar o potencial de aplicação dos chamados dispositivos elétricos inteligentes (medidores e elementos de controle) na automação das instalações elétricas residenciais e sua possível interação com as redes inteligentes.



Palavras-chave: Eletrotécnica. Automação. Residencial. Medição. Controle. Rede inteligente.

## ABSTRACT

CAIRES, Luis E. **Application of smart grid in residential electrical installations.** 2012. 184f. Master's Dissertation – Graduate Program on Energy, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

Electricity as an energy resource acquired vital importance in modern society because it allows relatively easily meet the demand for their services. Thus the demand for electricity increases with the evolution of populations who benefit from. The electrical system that produces this input is limited in its ability to available resources for generation, transmission and distribution. Roughly speaking this limit is set by the maximum power of the system. This maximum power can be achieved at certain times of the day, called peak hours and in most of the time the system is under utilized. Having the ability to control demand, you could use that excess capacity by transferring loads to more favorable times. For this there must be a coordinated action of many consumers to obtain operating results. Coordination would then be obtained through so-called smart grids that add functions and automation with various levels of complexity and constitute a very large system that binds generation to consumption. The noticeable difference is in the residential consumer of this fact be included in the operation of this network in near real time, or is awaiting more effective participation in the electrical system. One of the means designed to achieve this effect is through tariff incentives, where the variation of the energy cost would motivate consumers to change their consumption habits. To participate in this system the residential consumer needs to adapt its facilities to operate more efficiently by getting the maximum power at the lowest cost. It is not often that changing habits is the power of consumer, so it needs the means to adapt their electrical installations to this reality. Adaptation involves incorporating means for storing and managing energy resources so that the installation provides energy services at the time that is required, regardless of the time it purchases the necessary inputs. This requires, beyond the means of energy storage, as a control, given that residential consumers should not live according to their electrical out lets. This system would consist of standalone automatic elements derived from those used in industrial automation electrical control circuits. Therefore the aim of this work is to analyze the potential application of so-called smart electric devices (meters and control elements) in the automation of residential electrical installations and their interaction with the smart grid.

Keywords: Electrical Engineering. Automation. Residential. Measurement. Control. Smart Grid.

# 1. INTRODUÇÃO

Atualmente se atribui importância fundamental ao crescimento sustentável e embora o conceito não seja objeto deste estudo, ainda assim é um argumento que deve ser considerado na evolução da filosofia de projeto das instalações elétricas do futuro conectadas às chamadas redes inteligentes.

O crescimento sustentável foi definido no relatório *Nosso Futuro Comum* como aquele que satisfaz as necessidades das gerações presentes sem afetar a capacidade de gerações futuras de também satisfazerem suas próprias necessidades (1).

Existem muitas variáveis a serem ponderadas para a aplicação deste princípio, entretanto podemos iniciar o raciocínio a partir dele para fins de estudo.

A aplicação deste princípio da forma como apresentado é no mínimo uma tarefa complexa, pois envolve a definição de satisfação das necessidades presentes e futuras em um contexto variável. Por exemplo, um equipamento que satisfaz uma necessidade presente com um consumo de insumos energéticos pode evoluir fazendo o mesmo trabalho com menor demanda e com isso a definição de capacidade das gerações futuras satisfazerem suas necessidades varia na escala do tempo. Por outro lado o crescimento populacional pode compensar o aumento da eficiência dos equipamentos.

Além disso, a definição das necessidades presentes e futuras também muda durante as várias gerações em função do clima, da moda, etc.

Do ponto de vista da engenharia que visa atender às necessidades da sociedade a partir de recursos tecnológicos e teóricos definidos, não existe margem para ambigüidade.

Neste caso podemos interpretar por sustentável um sistema cuja manutenção possa ser assegurada durante sua vida útil a um custo aceitável. A sutil diferença na combinação de palavras de uma definição para sua interpretação está na forma de aplicação.

Nessa interpretação a primeira variável associada é o tempo, ou melhor, longevidade do projeto e a partir disso consideramos também os recursos disponíveis, facilidade de implementação, possibilidades de otimizações, possíveis impactos, evolução da tecnologia, etc.

Apresentado dessa forma se percebe que o crescimento sustentável é naturalmente considerado em um projeto de engenharia, mesmo que o alcance das variáveis consideradas não seja em escala global.

A própria evolução do sistema elétrico, do qual as instalações elétricas fazem parte é influenciado pelo conceito do crescimento sustentável.

Um exemplo que associa o crescimento sustentável às redes elétricas e a evolução da tecnologia pode ser encontrado no sistema elétrico americano.

O sistema elétrico americano que está envelhecendo, é ineficiente, congestionado e incapaz de atender as necessidades futuras de energia da economia da informação sem mudanças operacional e substancial investimento de capital nas próximas décadas, segundo informações extraídas de um documento emitido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos.(2).

Os americanos apontam níveis de risco e incerteza sem precedentes para as condições futuras da industria elétrica o que aumentou a preocupação com a capacidade do sistema de atender as necessidades futuras. Os esforços reguladores do governo sobre o mercado de energia elétrica não alcançaram o efeito esperado.

Existem muitas tecnologias promissoras no horizonte que podem ajudar a modernizar e expandir a capacidade do sistema de distribuição de energia elétrica, aliviar o congestionamento na transmissão e solucionar problemas de planejamento e operação. A revolução na tecnologia da informação que transformou as outras indústrias de rede na América (por exemplo, telecomunicações) ainda está para transformar o negócio da eletricidade. A proliferação de microprocessadores aumentou a exigência de confiabilidade e qualidade de energia.

Está cada vez mais difícil situar novas linhas de transmissão nos centros urbanos que experimentam maior crescimento de carga. A resolução deste dilema permanente pode utilizar a eletrônica de potência para permitir maior aproveitamento dos meios existentes de transmissão e o desenvolvimento de soluções de rede de baixo impacto que levam em consideração o uso do terreno.(2)

Esse cenário incentiva os americanos a procurar meios para modernizar seus sistemas de fornecimento de eletricidade visando superar as dificuldades para criar a rede elétrica do futuro. A observação de suas conclusões possibilita antever os possíveis desenvolvimentos para a resolução de problemas similares em outros lugares do mundo, como o Brasil, pois muitas vezes desenvolvemos nossos sistemas a partir de soluções importadas de países como os Estados Unidos.

Os americanos concluíram que o desembaraço dos sistemas elétricos críticos precisa ser acelerado, particularmente através do desenvolvimento de tecnologias, tais como a super condutividade em altas temperaturas de cabos e transformadores, dispositivos de armazenamento de eletricidade de baixo custo, padronização de arquiteturas e técnicas para inteligência distribuída e sistemas de potência inteligentes, além de sistemas de

geração mais limpos. É necessário também eliminar entraves políticos e reduzir os riscos e incertezas causados pela estrutura reguladora, o que inclui estabelecer as regras para as futuras redes de fornecimento de energia. A indústria investirá um grande capital nas próximas décadas para repor os equipamentos do sistema elétrico de potência. (2)

Um elemento que permeia e une essas idéias é informação. Os conhecimentos da demanda, da capacidade do sistema, do valor da energia são elementos que podem ser relacionados e interagir de modo a obter o resultado operacional desejado.

Para responder as exigências impostas ao sistema elétrico em tempo hábil é fundamental dispor de informações confiáveis e dinâmicas. Ao tornar a resposta em tempo real da demanda possível, uma rede inteligente tem o potencial para reduzir o alto custo associado ao pico, através da distribuição coordenada das cargas é possível maximizar a transmissão da energia.

A proposta da rede inteligente teria a capacidade de proporcionar aos operadores maior controle do sistema, permitindo o controle e distribuição de cargas modo a maximizar o aproveitamento de sua capacidade de transmissão de energia e dessa forma tende a diminuir o investimento em curto prazo. Os conceitos aplicados nas redes de distribuição tendem a se disseminar por todos os elementos do sistema chegando ao consumidor final que provavelmente será afetado por eles. Dessa forma o conhecimento do conceito da rede inteligente pode influenciar mudanças na filosofia de projeto das instalações elétricas das edificações.

O conceito de rede inteligente ou “smart grid”, em inglês, não está totalmente sedimentado, pois esse sistema está se desenvolvendo. Por isso existe um conjunto de atributos e elementos que descrevem aquilo que se pretende obter com ela. Por exemplo, uma rede inteligente deveria ser capaz de prevenir a falha total do sistema, permitir a identificação de furto de energia, facilitar a incorporação de novas fontes de energia, etc.

O discurso prolixo associado ao tema das redes inteligentes se deve ao conjunto de problemas que se espera suplantar com esse aperfeiçoamento da tecnologia existente, que figura como a cura de muitos dos males do sistema atual. Entretanto se implantado esse sistema é possível deduzir que poderá haver mudanças na forma como se relacionarão os consumidores e fornecedores que devem ter atribuições cada vez mais integradas e operar em simbiose.

Nessa associação de interesses, a retirada de carga em horários estratégicos pode ser visto pelo sistema como equivalente à geração localizada, por exemplo. Isso deve

ocorrer em um cenário em que as tarifas possam ser alteradas nos horários de pico de demanda.

De concreto se observam iniciativas no sentido de estabelecer uma base para o sistema, como, por exemplo, a troca dos medidores eletromecânicos por outros de tecnologia digital, como estão fazendo as concessionárias como a AES Eletropaulo, a Copel, a Ampla e a Light. Nesse sentido a motivação maior é a diminuição das perdas no sistema conforme se observará no capítulo 2. Entretanto, isso não exclui outras metas a partir das bases instaladas.

O dilema fundamental do consumidor residencial é, portanto, como se adaptar ao futuro das redes elétricas e como isso afetará suas instalações elétricas.

Para solucionar esse dilema é estrategicamente importante antecipar os elementos envolvidos com a finalidade de se estabelecer a configuração de uma possível nova realidade que se apresenta.

Embora, o conceito de rede inteligente ainda não esteja totalmente sedimentado, integrando vários pontos de vista e entendimentos a respeito do assunto é possível distinguir quatro níveis de classificação principais: nível da rede de energia, nível ambiental, nível gerencial, e nível de mercado (3).

- No nível da rede de energia a principal característica é a capacidade de auto-reparação e antiinterferência que é a base para o desenvolvimento da rede inteligente. Fundamentalmente, ao monitorar permanentemente o estado de funcionamento completo da rede, o sistema pode antever possíveis falhas ocultas através da auto-análise contínua e autodiagnóstico, então eliminar o defeito no menor tempo utilizando método automático. Em segundo lugar, a rede de energia pode perceber fatores externos como mudança na temperatura, no acesso ao suprimento de energia, e etc, e utiliza seus meios de modo inteligente para responder ativamente ao evento. No caso de desastres naturais como deslizamentos de terra, queda de árvores, enchentes, etc, as redes podem exibir uma elevada capacidade de auto-ajuste. Em terceiro lugar, no caso interrupção de interrupção do fornecimento, o sistema pode responder rapidamente e ser restaurado de modo ordenado, minimizando a influência da falha.
- No nível ambiental uma estrutura energética limpa é um requisito nativo ao desenvolvimento da rede inteligente. Essa rede necessita que o sistema de potência seja compatível com o modo de geração centralizado e distribuído, ou

seja, suporte as fontes tradicionais de energia e também a geração eólica, solar ou outra forma de energia limpa, além de permitir o acesso a dispositivos de armazenamento de energia. Dessa forma admite que a micro-geração e o sistema de potência possam se complementar e se sustentar através de uma administração abrangente e lógica.

- No nível gerencial é fundamental a elaboração de normas e utilização eficiente dos meios desenvolvidos para o progresso da rede inteligente. Primeiramente, através do estabelecimento de plataforma e especificação unificadas, a produção e gerenciamento do negócio de eletricidade terão um padrão mais minucioso e eficiente com relação aos processos e sistema de tributação. Isso deve aumentar o nível de complexidade da gerência e das operações. Além disso, permite otimizar a execução de projetos de energia pela sincronização e dimensionamento sensatos dos recursos. A combinação de equipamentos pode aumentar a eficiência dos ativos existentes reduzindo o custo de operação e manutenção.
- O mercado de eletricidade flexível e interativo é a suprema expressão de desenvolvimento para a rede inteligente. Essa rede deve prover uma plataforma livre para o mercado de eletricidade e transações de energia, oferecer alta qualidade de serviços e otimizar a distribuição de recursos e assim promover o desenvolvimento harmonioso da indústria, da sociedade da economia e do ambiente. Na base de um modelo de sistema aberto e distribuição de informações um tipo de conexão em tempo real entre consumidores e operadores do sistema será formado para realizar a interação bidirecional de alta velocidade. Os consumidores poderiam escolher o melhor esquema de suprimento de energia e os operadores do sistema poderiam direcionar melhor o fornecimento de energia. Em um esquema de dinâmica de mercado, a rede inteligente pode incentivar o consumidor a participar no condicionamento de energia, adquirindo energia do sistema nas horas mais favoráveis e evitando gastos nas horas de maior demanda.

Esses níveis podem ser vistos como um indicador da evolução das redes inteligentes iniciando da implementação dos equipamentos na rede até um controle da rede pelas leis do mercado em tempo real. Por outro lado esses níveis podem ser traduzidos como camadas que são sobrepostas para formar um sistema complexo e abrangente. Cada

camada suporta a camada seguinte e assim um conceito com alcance tão amplo pode ser desenvolvido.

De modo bastante simplificado o sistema operaria baseado em informações técnicas da rede, aliadas aos princípios de mercado e coordenado por mecanismos financeiros e tarifários.

Assim, a proposta deste trabalho é avaliar os diversos aspectos envolvidos para indicar princípios a serem seguidos em projetos de instalações elétricas residenciais que incorporem os avanços da automação. Para isso o trabalho foi dividido em seis capítulos que partem das seguintes premissas:

- Capítulo 1 – Proposição do cenário futuro e proposta de trabalho;
- Capítulo 2 – Descrição dos interesses envolvidos e indicação de variáveis de interesse;
- Capítulo 3 – Descrição de sistemas de automação e as aplicações potenciais nas instalações residenciais visando a operação em uma rede inteligente;
- Capítulo 4 – Revisão das bases teóricas dos sistemas de medição e introdução ao problema do fator de potência das cargas não lineares;
- Capítulo 5 – Estudo dos princípios operacionais dos medidores e sua relação com a automação residencial;
- Capítulo 6 – Descrição, em linhas gerais, da aplicação dos novos conceitos na automação das instalações residenciais e
- Capítulo 7 – Conclusão.

A partir desses elementos é possível conceber o conceito de uma instalação elétrica que seja sustentável dentro de um sistema elétrico que opera através das chamadas redes inteligentes.

# 2.A VARIÁVEL SOCIOECONÔMICA

A eletricidade como recurso energético adquiriu importância vital na sociedade moderna, pois permite atender de modo relativamente simples e flexível a demanda de energia.

Devido à facilidade com que se converte a energia elétrica em outras formas de energia, tais como calor, luz e força motriz esse insumo é preferido em muitas aplicações.

Chamamos de eletrotécnica a ciência que estuda as aplicações práticas da eletricidade, possibilitando, por exemplo, o transporte de energia de modo seguro a grandes distâncias, através das redes elétricas.

O funcionamento de uma rede elétrica que depende de recursos materiais e das operações técnicas e representa um custo para a sociedade.

Esse custo é distribuído pela sociedade e para o consumidor, particularmente o residencial, se traduz na fatura mensal.

Devido aos interesses econômicos das concessionárias depois das privatizações e as conseqüentes pressões da sociedade pela manutenção da qualidade do serviço, as redes elétricas passaram a trabalhar em condições mais restritas. Dessa forma aumentou a exigência de desempenho econômico e diminuição das perdas das redes.

Simultaneamente e incentivado por isso, vem se desenvolvendo pelo mundo a chamada rede inteligente (do inglês “smart grid”) e do outro lado os edifícios inteligentes (do inglês “smart buildings”) cujos sistemas associados permitem otimizar os recursos do sistema na medida em que possibilitam o gerenciamento pelo lado da demanda em tempo real.

Esses fatos associados podem modificar a forma pela qual os consumidores residenciais vão adquirir a energia elétrica, pois este será cada vez mais incentivado a participar de maneira integrada ao sistema.

Nesse cenário o aproveitamento das fontes renováveis, o armazenamento de energia, a automação das instalações, etc podem se tornar alternativas viáveis frente aos custos da aquisição da energia em um mercado dinâmico e comprador ávido do insumo.

Dessa forma o objetivo deste capítulo é apresentar uma visão geral do sistema de potência associada aos custos sociais e econômicos envolvidos. A partir dessa premissa é possível avaliar qual a melhor solução técnica para adequar uma instalação elétrica à rede na qual ela está inserida visando obter o máximo benefício com o menor dispêndio de recurso.

No final do capítulo há um exemplo de análise que envolve variáveis técnicas e econômicas visando à tomada de uma decisão simples.

## 2.1. Estrutura econômica do sistema de potência

A estrutura genérica do sistema elétrico em função de seus ativos é formada por geradores, transformadores, linhas de transmissão e alimentadores de distribuição (6). Geralmente os geradores utilizados nesse sistema transformam energia mecânica em energia elétrica. A energia mecânica é fornecida por turbinas hidráulicas ou a vapor. Neste último caso, a energia térmica pode ter diversas origens: carvão, gás, nuclear, óleo, bagaço de cana, entre outras. No Brasil é predominante o uso do potencial hidráulico (74%), conforme se observa na Figura 2.1.
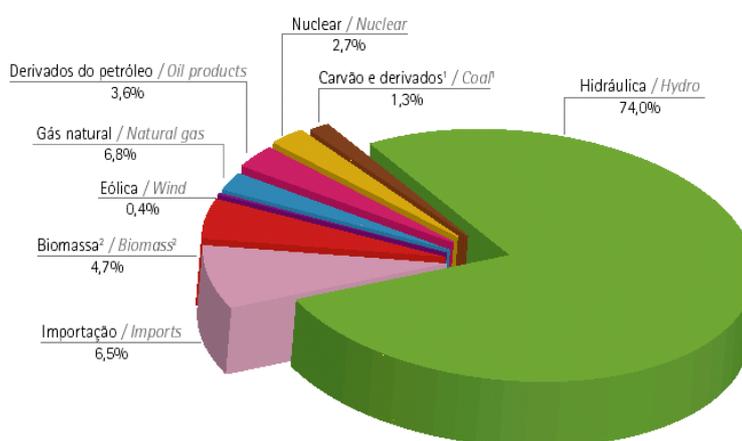
**Figura 2.1- Gráfico da distribuição das fontes primárias na geração de eletricidade do Brasil em 2010**
Fonte: BEN (2011).

Quando consideramos a distribuição das fontes primárias para a indústria de eletricidade no mundo o quadro muda totalmente.
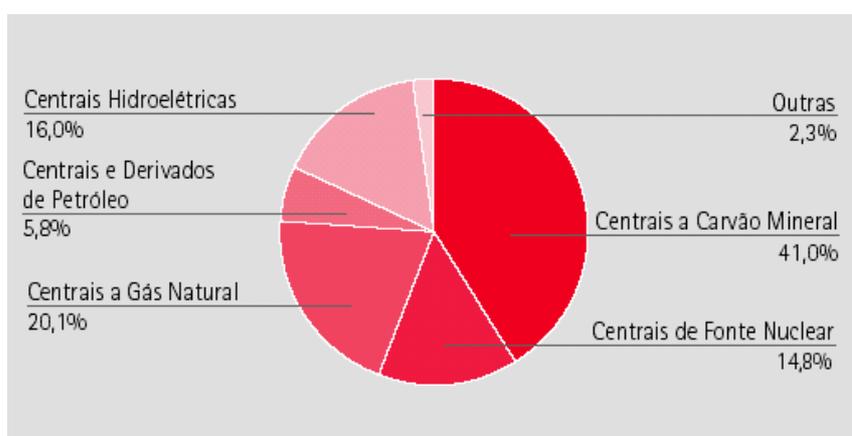
**Figura 2.2 - Gráfico da distribuição das fontes primárias na geração de eletricidade Mundial em 2007**
Fonte: BEN (2008).

Os locais onde ocorrem os aproveitamentos do potencial hidráulico geralmente se encontram longe dos centros consumidores. Por isso a energia elétrica tem de vencer grandes distâncias através das linhas de transmissão para alcançar o consumidor.

A perda de energia nos condutores das linhas de transmissão é diretamente proporcional ao comprimento dos condutores e ao quadrado do valor da corrente. Por outro lado, a potência transmitida pela rede elétrica é proporcional ao produto da tensão pela corrente e através da combinação dos valores de ambos é possível diminuir as perdas. Com isso se utilizam tensões mais altas e correntes mais baixas para uma mesma potência transmitida pela linha.

Na realidade o valor da tensão é limitado pelas perdas no dielétrico e pelos custos com os dispositivos de isolamento, que devem ser instalados em estruturas (torres) muito altas. Além disso, o custo das subestações transformadoras e de manutenção do sistema para alta tensão também é elevado. Se o nível da tensão de trabalho não é fundamentado economicamente, as despesas adicionais podem resultar superiores à economia devido à diminuição da perda por aquecimento nos condutores.

“Nos projetos de abastecimento de energia elétrica a tensão de trabalho é escolhida por um lado de acordo com o custo do equipamento elétrico, e por outro lado, de acordo com o custo da energia elétrica nesta região. Pode considerar-se muito aproximadamente que para as linhas elétricas de extensão média a mais conveniente é a tensão de 1 kV por cada quilômetro de linha. Por exemplo, para uma linha de 200 km é conveniente a tensão de trabalho de 200 kV. Ao escolher a tensão deve ter-se em conta que ela deve corresponder a uma das tensões padronizadas.”(28)

Por razões práticas, a potência entregue aos centros de carga não pode, em geral, ser consumida nos níveis de tensão em que é feita a transmissão. Nessa etapa são utilizados transformadores abaixadores para reduzir o nível de tensão e assim abastecer as redes de distribuição. Isso acarreta um aumento correspondente dos níveis de corrente e as perdas, mas isso normalmente é aceitável, pois ocorre nas proximidades das cargas e não impede o aproveitamento da energia.

Dentro desta descrição é possível identificar três áreas de interesse para exploração econômica e que formam a base da estrutura econômica: a geração, a transmissão e a distribuição da energia.

Até recentemente, tanto no Brasil como no exterior, as empresas de energia elétrica se organizaram predominantemente pelo modelo de integração vertical, ou seja, uma mesma empresa controlando a geração, a transmissão e a distribuição da energia elétrica. A tendência internacional que se observa é no sentido da “desverticalização” das empresas de

energia elétrica. Em muitos países, o Brasil entre eles, essa tendência veio acompanhada da privatização de partes do setor elétrico. Em outros países, onde as empresas concessionárias já são privatizadas em sua maioria, como é o caso dos Estados Unidos, a “desverticalização” procura desmembrar as empresas em várias geradoras (GENCOS), várias distribuidoras (DISCOS) e várias empresas de transmissão (TRANSCOS). A parte tecnicamente mais difícil se refere às empresas de transmissão, cuja operação passa a ser coordenada por um novo tipo de empresa: um operador independente (ISO- *Independent System Operator*) como ocorre na Califórnia. No Brasil essa função é controlada pelo estado através do ONS, Operador Nacional do Sistema.

Em países como o Brasil a “desverticalização” e privatização é motivada pela busca de recursos na iniciativa privada a serem investidos na indústria de energia elétrica; nos Estados Unidos, a motivação é a redução dos custos para o consumidor final, através da adoção do princípio da competição no mercado.

A pulverização em empresas geradoras e distribuidoras deveria levar a uma maior competição e desenvolvimento de mecanismos de controle de oferta e demanda típicos de mercado. Dois tipos de transações podem ocorrer nesse sistema: contratos fixos de longo prazo e mercado “spot”. O mercado fixo forma a base das transações, enquanto que o mercado “spot” tem um caráter complementar, correspondente a um ajuste fino de curto prazo.

“Porém devido ao caráter de oligopólio do setor os princípios que regem os mercados não puderam ser efetivados plenamente no Brasil. Desta forma os princípios de otimização econômica praticada no setor privado para aumento de seu desempenho, atuam de modo desfavorável ao fornecimento desse serviço básico que é de interesse da sociedade.” (6)

Para garantir ao menos condições mínimas é necessária a fiscalização do governo na figura das agências reguladoras. No Brasil essa função é exercida pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

Essa estrutura caracteriza o sistema de potência do ponto de vista institucional, porém a sua dinâmica está sujeita a hidrologia e aos interesses dos grupos econômicos envolvidos.

## 2.2. Os indicadores de continuidade do serviço.

Devido à complexidade física do sistema de potência existem vários agentes que atuam no fornecimento de energia. No Brasil existem empresas geradoras, empresas distribuidoras e

empresas de transmissão, sendo que essas últimas são coordenadas por uma empresa independente que é denominada como Operador Nacional do Sistema (ONS). Esse sistema é reflexo da estrutura de um sistema elétrico, particularmente um que opera com grande participação hidráulica onde se encontram centrais geradoras, linhas de transmissão e redes de distribuição.

Visando disciplinar a ação das concessionárias a ANEEL mede seu desempenho quanto à continuidade do serviço prestado com base em indicadores específicos, comumente conhecidos por *DEC* e *FEC*. (10).

O *DEC* é um acrônimo para Duração Equivalente de interrupção por unidade Consumidora e indica o número médio de horas que o consumidor ficou sem energia durante um período contábil, geralmente um mês. O *FEC* é a Freqüência Equivalente de interrupção por unidade Consumidora e indica, em média, quantas vezes uma unidade consumidora ficou sem o fornecimento de energia, dentro do período contábil de um mês.

Esses valores são expressos como a média de um grupo de consumidores de uma região, selecionados conforme critérios indicados pela concessionária e aprovados pelo órgão regulador.

O *DEC* pode ser calculado por:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_a(i) * T(i)}{C_s} \qquad (2.1)$$

Onde:

$i$ é o número de interrupções, variando de 1 a n;

$T(i)$ é a duração de cada interrupção do conjunto de consumidores considerado, em horas;

$C_a(i)$ é o número de consumidores do conjunto considerado, atingido nas interrupções;

$C_s$ é o número total de consumidores do conjunto considerado.

O *FEC* pode ser calculado por:

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_a(i)}{C_s} \qquad (2.2)$$

Trata-se de uma média ponderada pela relação entre o número de consumidores afetados pelo número total de consumidores na região considerada. Dessa forma pode existir uma

grande diferença entre o valor atribuído para determinada região e o valor observado pelo consumidor.

Essa relação pode ser observada mais facilmente se observarmos a evolução dos indicadores do Brasil comparado ao das regiões administrativas. As médias calculadas a partir dos valores regionais são maiores do que os respectivos valores apontados para o Brasil.

Tabela 2.1 – Evolução do DEC por região.

| Região/ano | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Norte | 33,78 | 41,15 | 41,48 | 51,96 | 60,99 | 67,84 | 76,8 |
| Nordeste | 23,3 | 22,58 | 21,41 | 18,14 | 18,39 | 18,72 | 20,7 |
| Centro-oeste | 19,51 | 21,7 | 19,52 | 21,5 | 21,17 | 22,22 | 19,63 |
| Sudeste | 9,56 | 10,43 | 9,78 | 10,19 | 10,56 | 13,6 | 11,43 |
| Sul | 16,56 | 17,46 | 17,44 | 17,23 | 15,66 | 16,08 | 14,49 |
| Média | 20,54 | 22,74 | 21,93 | 23,80 | 25,35 | 27,69 | 28,61 |
| Brasil | 15,81 | 16,75 | 16,04 | 16,14 | 16,65 | 18,77 | 18,4 |

Fonte: Elaboração própria com dados da ANEEL

Tabela 2.2 – Evolução do FEC por região.

| Região/ano | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Norte | 36,35 | 40,52 | 38,08 | 45,79 | 45,23 | 47,27 | 49,07 |
| Nordeste | 15,01 | 14,44 | 12,85 | 12,15 | 11,12 | 10,81 | 11,25 |
| Centro-oeste | 17,65 | 18,4 | 18,33 | 18,75 | 18,87 | 18,39 | 15,64 |
| Sudeste | 6,98 | 7,46 | 6,6 | 6,66 | 6,65 | 7,38 | 6,6 |
| Sul | 13,69 | 13,85 | 13,3 | 12,97 | 11,53 | 11,12 | 10,52 |
| Média | 17,94 | 18,93 | 17,83 | 19,26 | 18,68 | 18,99 | 18,62 |
| Brasil | 12,12 | 12,53 | 11,53 | 11,81 | 11,37 | 11,72 | 11,35 |

Fonte: Elaboração própria com dados da ANEEL

Nesses gráficos se observa que há uma considerável diferença regional no padrão do fornecimento de energia e mesmo havendo indicadores legais para fiscalização, há regiões menos favorecidas. O índice geral para o Brasil tende a se alinhar em um nível próximo dos melhores valores, pois é maior a concentração populacional nesses locais. Essa tendência verificada nesses números agregados pode se estender para os indicadores regionais e suas ramificações até atingir o ponto de vista do consumidor. Isto significa que mesmo que o

indicador de uma determinada região aponte valores aceitáveis, pode haver locais não atendidos com a mesma qualidade de fornecimento.

Por isso esses indicadores muitas vezes são insuficientes para avaliar adequadamente a qualidade da energia percebida pelo consumidor.

Fundamentalmente esses indicadores contemplam a continuidade do serviço, já que é evidente que a interrupção implica em transtornos. Por outro lado, a questão da qualidade de energia é relevante, pois também pode provocar a descontinuidade dos serviços prestados pela energia elétrica e trazer prejuízos. Porém nesses casos a determinação é mais trabalhosa que a simples detecção da falta no fornecimento.

Exemplo claro disso são as linhas de produção automatizadas, nas quais uma queda de tensão, mesmo que momentânea pode acarretar grandes atrasos por conta do reinicio da cadeia produtiva. Nos escritórios e residências os sistemas computacionais, cada vez mais presentes, muitas vezes são afetados por tais distúrbios, causando prejuízos devido à perda de informações críticas em momentos inoportunos.

Entretanto os indicadores que figuram nas tarifas de energia e que determinam eventuais multas para as concessionárias não contemplam eventos momentâneos ou transitórios.

A ANEEL implantou em 2000 mais três indicadores para refletir mais adequadamente o ponto de vista do consumidor individual: DIC, FIC e DMIC. (11)

O DIC é a Duração de Interrupção por unidade Consumidora, o FIC é a Freqüência de Interrupção por unidade Consumidora e indicam respectivamente por quanto tempo e o número de vezes que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um período contábil considerado.

O DMIC é a Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora é o indicador que limita o tempo máximo de cada interrupção e deve impedir que a concessionária deixe o consumidor sem energia por um período muito longo. Esse indicador já é controlado desde 2003. As metas para os indicadores DIC, FIC e DIMIC estão publicadas na Resolução 024 da ANEEL desde janeiro de 2000, sendo informadas na conta de energia elétrica do consumidor as metas para o DIC e FIC.

A existência de indicadores e multas, contudo não assegura a evolução para melhor nos serviços prestados, conforme se observa pelos números das Tabelas 2.1 e 2.2. A tendência observada é a manutenção dos níveis e no caso da região norte houve até a degradação dos parâmetros associados a confiabilidade dos serviços.

Um estudo sobre os impactos da privatização sobre a qualidade dos serviços de uma distribuidora de energia aponta algumas proposições interessantes sobre o ponto de vista das concessionárias. (13):

- A empresa vem investindo intensamente na qualidade das informações comerciais que vão desde o processo de leitura, faturamento, arrecadação e até o desenvolvimento e implementação de estratégias mais eficientes no aspecto de qualidade do atendimento;
- Os indicadores DEC e FEC Brasil evidenciam a evolução do nível de qualidade dos serviços prestados pelas empresas distribuidoras de energia elétrica, resultado de investimentos praticados em infra-estrutura e atendimento ao cliente;
- As empresas distribuidoras de energia elétrica privatizada a partir de 1996, estão em geral, em situação crítica em razão de diversos fatores que conjugados com o nível de perdas comerciais e a redução crescente de demanda por energia elétrica reduzem a atratividade e a capacidade de investimentos dessas empresas;
- Buscando a valorização de seus clientes como principal estratégia de crescimento, a empresa vem adotando novas estratégias de negócios que possam lhe assegurar resultados superiores aos de suas práticas regulares. Entretanto, como descobrir quais as melhores práticas e estratégias? Como é possível crescer sob a constante vigilância dos órgãos governamentais? Como equilibrar o fornecimento seguro de serviços com uma relação favorável entre os custos e benefícios;
- A empresa deve ser capaz de encontrar soluções inovadoras e garantir que os processos, tecnologia e pessoas estejam alinhados à sua estratégia de negócio, para transformar o relacionamento com seus clientes em oportunidades de negócios, gerando resultados positivos sustentáveis de longo prazo e o equilíbrio econômico-financeiro na busca da rentabilidade empresarial;
- A comparação entre a evolução dos indicadores DEC e FEC Brasil e da Light evidenciam que há um alinhamento estratégico entre as empresas distribuidoras do setor elétrico e.
- A percepção dos clientes no aspecto Atendimento, Fatura, Imagem e Satisfação Geral foi mal avaliada pelos seus clientes ficando abaixo do índice ABRADEE.

Assumindo todas essas premissas como verdadeiras observamos que há um grande interesse nas informações comerciais. Esse aspecto em particular parece motivar o interesse nas tecnologias mais modernas de medição, o chamado medidor inteligente (do inglês “smart meter”).

Esses medidores incorporam tecnologia de comunicação remota e algumas funções de medição e registro que os antigos medidores eletromecânicos não dispunham. Isso possibilita medição em áreas de difícil acesso e a apuração de valores antes indisponíveis para o cálculo rotineiro da tarifa, por exemplo, a medição do fator de potência.

A medição do fator de potência pode ser um problema para o consumidor residencial, pois torna possível a concessionária cobrar pela energia reativa excedente. Atualmente muitas das cargas domésticas apresentam baixo fator de potência. Esse aspecto da qualidade dos equipamentos adquiridos pelo consumidor ainda não é levado em consideração, pois na maioria das instalações os medidores

Existem dois aspectos importantes nesse processo: a medição e a metodologia de cálculo das multas, como se observa no capítulo 5 e no final deste capítulo.

Percebe-se, portanto a ênfase na otimização econômica dos recursos, seguindo o princípio de reduzir as perdas, para maximizar os ganhos.

Essa lógica provavelmente é induzida pelo mecanismo de incentivo utilizado para o reajuste das tarifas de distribuição de eletricidade, que é herança da reforma do setor elétrico brasileiro, implementada em meados da década de 90. (14).

Esse mecanismo de incentivo visa induzir a empresa monopolista regulada a se comportar como se atuasse em um ambiente competitivo, onde o ponto de equilíbrio de mercado é norteado pelo preço teto (“price cap”, em inglês), posto que as regras de mercado normais não se aplicam a esse tipo de empresa.

Dessa forma se espera que a empresa procure aumentar os níveis de eficiência produtiva e de alocação, sendo que o regime de preço teto o mais utilizado atualmente nos vários países cuja atividade de fornecimento de serviço com característica de monopólio natural requerem a fiscalização por órgãos reguladores.

Basicamente esse regime consiste em impor limites para as tarifas, que são mantidos estáveis em termos reais por intervalos de tempo de quatro a cinco anos entre as revisões tarifárias. Nesse intervalo o preço teto é reajustado de acordo com uma fórmula que varia para cada país, mas, em geral é a seguinte:

$$\Delta PC = P - X \pm Z \qquad (2.3)$$

Onde:

*DPC* é o reajuste do preço teto “Price Cap”;

*P* é o índice da inflação;

*X* é o fator de produtividade;

*Z* é a variação de custos não gerenciáveis.

A principal vantagem desse regime é incentivar a empresa concessionária dos serviços regulados a adotar medidas de redução em seus custos gerenciáveis para além do fator de produtividade estipulado *X*, sendo permitido que ela se aproprie dos ganhos advindos dessa redução até a próxima revisão.

O fator Z visa ajustar as tarifas no caso de mudanças nos custos não gerenciáveis da empresa, tais como, aumento de impostos, introdução de políticas de conservação de energia que não são repostas pela inflação ou pelo fator *X*.

Os custos gerenciáveis das empresas distribuidoras de energia se dividem, grosso modo igualmente entre despesas com operação e manutenção e remuneração de capital.

As despesas com operação e manutenção são basicamente divididas entre materiais, equipamentos e pessoal.

A parcela relacionada à remuneração de capital corresponde ao custo de oportunidade dos investimentos em instalações da rede elétrica e outros ativos utilizados na prestação do serviço. A remuneração do capital dos investidores, que corresponde ao custo de oportunidade depende de fatores como a taxa de juros da economia, risco de captação, grau de “alavancagem” da empresa, variação da taxa de câmbio, já que as empresas do setor elétrico são altamente endividadas em moeda estrangeira.

Há, portanto um incentivo para as empresas a reduzir os custos gerenciáveis e dentro destes se encontram as despesas com manutenção e operação, bem como a parcela relacionada à remuneração do capital investido.

Essa linha de raciocínio pode levar a um resultado lógico previsível onde a confiabilidade no fornecimento da energia poderia ser comprometida.

Naturalmente a interação entre a maximização econômica com o imperativo de fornecer energia com nível de qualidade assegurada pode levar a um planejamento voltado a otimização de índices de confiabilidade. (15)

Partindo da premissa que esses indicadores podem não representar adequadamente o ponto de vista do consumidor, a alocação ótima dos recursos baseada nesses princípios pode levar a resultados ruins em determinadas situações, o que levaria a perda da confiança na capacidade do fornecedor em prestar os serviços e no governo para fiscalizar efetivamente.

Esses consumidores teriam de se adaptar a qualidade do serviço prestado em função de seus recursos, o que levaria a inúmeras possibilidades. A forma como os consumidores percebem os fornecedores influencia o modo de administrar a curto e longo prazo as suas instalações elétricas o que justifica a existência de geradores e o aproveitamento de fontes alternativas de energia em determinados lugares.

Dessa forma, com o intuito de prosseguir com o estudo se pode resumir de modo bastante simplificado o grupo denominado de fornecedores como sendo o agente que entrega o insumo energético para o consumidor com um nível de confiabilidade assegurado no fornecimento, fiscalizado por agente regulador do governo. Devido ao processo de privatização esse grupo passo a ter maior foco no rendimento econômico que na eficiência técnica. Aufere lucro dessa atividade, mas não segue as leis de mercado ordinárias por ser um setor de monopólio natural. Ao invés disso é submetido a um regime de preço teto controlado que visa emular o comportamento de equilíbrio de mercado, criando um ponto de referência para eficiência econômica, proporcional à redução dos custos operacionais, dentre eles a operação e manutenção.

A rede inteligente torna possível gerenciar a demanda em tempo real e dessa forma obter o desempenho energético ótimo da rede, através do controle da demanda em tempo real. Com isso se esperam retardar os investimentos na ampliação da capacidade do sistema. Além disso, se espera que através de sistemas de medição remota e cálculo de tarifas mais sofisticado se diminuam as perdas. Associado a isso a operação otimizada em função dos dados disponíveis tende a diminuir os gastos com manutenção (preventiva ou corretiva).

## 2.3. As perdas no setor elétrico

Estima-se que as perdas não técnicas (furtos) e a inadimplência no setor elétrico brasileiro geram um prejuízo médio de seis bilhões de reais ao ano e por isso se constituem em um problema para a sociedade com reflexos sobre o valor da tarifa e como conseqüência sobre a eficiência econômica do país. (16).

Historicamente o universo das perdas totais que engloba as perdas técnicas e não técnicas se traduzem em média 15% da energia comprada pelas distribuidoras para o atendimento de seu mercado consumidor. (16). O cálculo das perdas totais é feito através da diferença entre a energia adquirida pelas distribuidoras e a efetivamente fornecida aos consumidores.

As perdas técnicas são inerentes aos equipamentos elétricos do sistema, sendo limitadas pela qualidade dos dispositivos e em última análise pelas leis da física. Tais perdas são

parcialmente gerenciáveis pelas distribuidoras a partir de melhorias nas suas instalações. Seu montante pode ser estimado por modelos elétricos de equipamentos e redes.

As perdas não técnicas ou perdas comerciais correspondem à diferença entre as perdas totais e as perdas técnicas, sendo devidas a furtos, fraudes e erros nos processos de faturamento. Isso implica no aumento das tarifas para os consumidores, que pagam pela geração e o transporte da energia elétrica furtada. No Brasil esse problema corresponde a cerca de 5% da energia total requerida pelas distribuidoras, o que representa um ônus anual de cinco bilhões de reais e um impacto tarifário de 4 a 17% dependendo da concessionária. A tabela a seguir mostra a variação das perdas em função da concessionária.

Tabela 2.3 – Perdas comerciais (% do mercado de venda de energia)

| CONCESSIONÁRIA | PERDA | CONCESSIONÁRIA | PERDA |
|---|---|---|---|
| EEB-BRAGANTINA | 0,2% | COELBA | 6,5% |
| CAIUÁ | 0,4% | CELPA | 6,7% |
| RGE | 1,1% | ELETROPAULO | 8,4% |
| BANDEIRANTE | 1,2% | AMPLA | 15,2% |
| COPEL | 1,3% | LIGHT | 15,7% |
| CELESC | 1,3% | CELPE | 18,7% |
| CPFL | 2,6% | CEMAR | 21,3% |
| ELEKTRO | 3,0% | CEPISA | 26,1% |
| PIRATININGA | 3,9% | CERON | 29,5% |
| COSERN | 6,5% | | |

Fonte:ANEEL, 2005.

Dentro das perdas não técnicas ou comerciais, a inadimplência corresponde ao montante da receita faturada e não recebida pela distribuidora. O índice de inadimplência expressa esse montante como percentagem do faturamento total anual acumulado.

Estima-se que as contas vencidas e irrecuperáveis do setor correspondam a 1,2% do faturamento, o que totaliza aproximadamente um bilhão de real ao ano.

Dentro das iniciativas para o combate às perdas está o desenvolvimento de novas tecnologias e procedimentos que dificultem o furto de energia e mecanismos mais eficazes de cobrança de faturas em atraso, além da disseminação do uso adequado da energia, aí englobando não só os aspectos relacionados ao uso seguro, mas também eficaz e adequado ao orçamento doméstico dos consumidores (16).

Aos demais integrantes da sociedade é necessário o entendimento que a energia elétrica é um bem público essencial, porém para termos a eletricidade à nossa disposição são necessários investimentos intensos que devem ser corretamente remunerados. Desta forma, o comportamento inadequado de alguns consumidores acarreta tarifas maiores para os demais, ou seja, a aceitação da fraude/furto de energia e inadimplência como atitudes normais e aceitas pela sociedade implica em que todos paguem por isso. (16)

Nesse contexto o conceito de rede inteligente se coloca para suplantar o problema das perdas através da possibilidade do controle mais rigoroso do sistema. A implantação dessas redes afetará concessionárias e consumidores e a dinâmica do processo provavelmente deve seguir o princípio da ação e reação. A partir dessas premissas e observando e classificando o consumidor se pode divisar a estratégia deste em função da realidade que lhe é imposta.

## 2.4. As modalidades de tarifa

A estrutura do sistema de potência determina as possibilidades para o consumidor, que em função dos seus limites e suas regras define suas próprias estratégias de aquisição da energia.

A compreensão das formas de se pagar pela energia adquirida é fundamental para as decisões sobre projetos de aproveitamento energético. (17)

A resolução 456 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, publicada no Diário Oficial em 29 de novembro de 2000 definia as alternativas de enquadramento tarifário, inclusive as penalidades para a ultrapassagem de determinados parâmetros, permitindo distinguir as possibilidades para o consumidor. Foi substituída pela resolução 414 de 9 de setembro de 2010, mas muitos dos princípios que compunham a 456 ainda permanecem válidos nesta versão.

A distinção feita entre os consumidores se baseia no consumo de energia, por exemplo, os pequenos consumidores, como as residências pagam apenas a energia utilizada (consumo), os médios e os grandes pagam tanto pela energia quanto pela potência. A potência aparece nas contas desses consumidores com o nome de demanda e há cobrança de multas se ela supera determinados valores, de modo que para o consumidor é vantajoso evitar picos de potência.

Em algumas modalidades tarifárias existe distinção em função do tempo, de modo que em certos horários a demanda e o consumo de energia elétrica tem preços mais elevados. Isso ocorre nos horários de ponta que é um período de três horas consecutivas definido pelas

concessionárias em função das características de seu sistema elétrico, o restante das vinte e uma horas do dia corresponde ao horário fora de ponta.

Ainda com relação à variável tempo, existem épocas do ano com maior incidência de chuvas, quando os reservatórios operam no topo de sua capacidade e épocas onde essa capacidade é reduzida.

Levando em conta os períodos sazonais precisamos definir os períodos seco e úmido. Para efeito das tarifas, o ano é dividido em dois períodos, um seco que compreende os meses de maio a novembro (sete meses) e um úmido, que corresponde os meses de dezembro a abril (cinco meses). Em algumas modalidades tarifárias, no período seco o consumo tem preço mais elevado e isso reflete o regime hidrológico que é de vital importância para a base do sistema que no Brasil é constituída por usinas hidrelétricas.

Os consumidores são classificados pelo nível de tensão em que são atendidos. Os consumidores atendidos em baixa tensão, próximos a 127 ou 220 V, tais como lojas, residências, agências bancárias, pequenas oficinas, edifícios residenciais e parte dos edifícios comerciais, são classificados no grupo B. Esse grupo também é dividido em subgrupos, de acordo com a atividade do consumidor, por exemplo, os consumidores residenciais são classificados como B1, os rurais como B2, etc.

De acordo com a nota técnica n° 362/2010, artigo 121, existe uma estrutura tarifária proposta que consiste em duas modalidades tarifárias (18;19):

- Modalidade convencional: monômia, com um preço de consumo de energia em R$/kWh, sem levar em consideração o horário, sendo atualmente praticada e sedimentada pelas disposições legais existentes. Não existe possibilidade de incentivo a mudança de hábitos de consumo nessa modalidade, além da simples redução ou ampliação em função do custo.
- Além desta se propõe à possibilidade da modalidade branca: monômia, com três tipos de preços de consumo de energia em R$/kWh, de acordo com os postos tarifários. Essa modalidade depende do grau de desenvolvimento da infra-estrutura de medição.

O objetivo apresentado pela ANEEL é dispor de uma variedade maior de modalidades tarifárias, com a finalidade de obter os efeitos positivos sobre o uso de um sistema regulado pelo deslocamento temporal do consumo. (18). A tarifa horária varia em função do período do dia relacionado à demanda de energia .

O artigo 123 define os postos tarifários denominados de: posto de ponta, intermediário e fora de ponta. O posto de ponta será aplicado conforme o disposto na Resolução Normativa nº

414, de 9 de setembro de 2010, que estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada, in verbis. (18):

"horário de ponta ($H_p$): período composto por 3 (três) horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora considerando a curva de carga de seu sistema elétrico, aprovado pela ANEEL para toda a área de concessão, com exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, Corpus Christi, e os seguintes feriados..."

O horário intermediário ($H_i$) será definido como o período de 2 (duas) horas, sendo 1 (uma) hora imediatamente anterior ao horário de ponta e 1 (uma) hora imediatamente posterior ao horário de ponta. O objetivo é de evitar o deslocamento das cargas da ponta para picos adjacentes.

"O artigo 126 fala sobre a transição de horários e a definição da constante *kz*. As relações ponta/fora de ponta e intermediário/fora de ponta serão definidas como cinco e três, respectivamente, para a tarifa de uso do sistema de distribuição, excluído eventual sinal horário na energia" (18)

$$\frac{T_P}{T_{FP}} = 5 \quad \text{e} \quad \frac{T_i}{T_{FP}} = 3 \qquad (2.4)$$

Onde:

$T_P$ é a tarifa no horário de ponta;

$T_i$ é a tarifa no horário intermediário $H_i = H_p \pm 1$;

$T_{FP}$ é a tarifa fora de ponta;

"No processo de revisão tarifária será definida a constante **kz**, relação entre a tarifa do posto fora de ponta da modalidade branca e a tarifa convencional, que será necessariamente menor que a unidade" (18)

$$kz = \frac{T_{FP}}{T_C} < 1 \qquad (2.5)$$

Onde:

$T_C$ é a tarifa convencional.

A vantagem auferida pelo consumidor varia em função do perfil de consumo e da relação entre as duas modalidades tarifárias expressa em 2.5. A nota técnica nº362/2010 apresentou uma série de gráficos que apresentam a relação entre a fatura com a tarifa branca sobre a tarifa convencional em função da relação entre a energia total sobre a energia consumida no horário de ponta mais patamar intermediário.
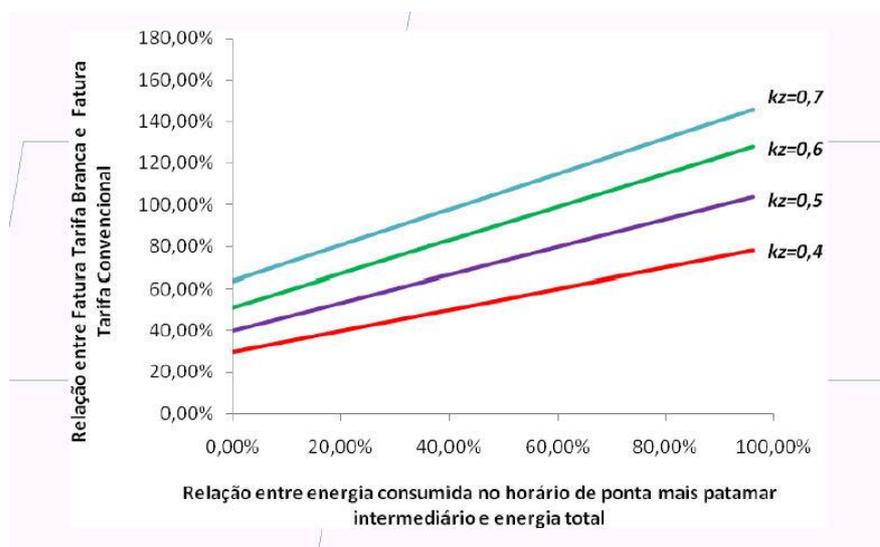
**Figura 2.6 – Percentual de redução da fatura em função do perfil de consumo**
Fonte: SAD/ANEEL. 07/2010 na Nota Técnica nº 362/2010-SER-SRD/ANEEL, 06/12/2010

A partir do gráfico exibido na Figura 2.6 se pode observar algumas relações interessantes.

Quando *kz* é maior que 0,6 existem casos no qual a fatura branca supera a tarifa convencional, ou seja, a relação entre as tarifas é maior que 100%.

Dependendo da orientação adotada através de *kz* o benefício da tarifa branca somente será alcançado por um maior deslocamento de cargas dos horários de ponta.

Por exemplo, se *kz* é igual a 0,6, no máximo 60% da energia pode ser consumida no horário de ponta mais patamar intermediário, para que a relação entre a tarifa branca e a tarifa convencional seja um (ou 100%). Se *kz* é igual a 0,4 toda a energia pode ser consumida no horário de ponta mais patamar intermediário, o que resulta em uma relação de aproximadamente 80%, favorável à tarifa branca.

Podem ser realizados vários estudos a parir dessas premissas que envolvem o deslocamento de cargas. O efetivo deslocamento das cargas vai depender dos recursos disponíveis e o custo de implementação comparado à economia com a tarifa de energia.

Os artigos 128 e 129 tratam sobre a abrangência dessa proposta tarifária. A modalidade tarifária branca opcional abrangerá o subgrupo residencial com consumo médio mensal maior do que 200kWh, de acordo com o plano de substituição de medidores a ser definido pela ANEEL (a ser tratado em audiência pública). Consumidores residenciais com consumo maior do que 500kWh serão enquadrados compulsoriamente na tarifa branca, seguindo o plano de substituição de medidores, pois, considerando a energia como um bem comum, espera-se que uma melhor apropriação resulte em benefício da sociedade.

A modalidade tarifária branca opcional será aplicada ao subgrupo comercial e industrial (B3) sem distinção de consumo. Por outro lado, consumidores com consumo acima de 2000kWh serão enquadrados compulsoriamente na tarifa branca, seguindo o plano de substituição de medidores. Espera-se que essa modalidade possa provocar a mudança no hábito de consumo e incentivar a incorporação de novas tecnologias e processos mais eficientes ao sistema elétrico. A tarifa branca estará mais próxima dos custos reais, imputados ao sistema elétrico, do que a tarifa convencional. Característica desejável para consumidores com alto consumo relativo.

A troca de medidor é condição fundamental para a modalidade tarifária branca, entretanto

Essas regras simples visam incentivar o consumidor da classe B a mudar seus hábitos e assim evitar picos de demanda.

## 2.5. Faturamento de energia e demanda reativa

A demanda de energia reativa constitui uma ineficiência no aproveitamento dos recursos do sistema elétrico de potência, pois não produz trabalho útil e consome recursos para seu controle.

Essa energia se traduz no fator de potência e devido ao fato de se constituir em um vício para o sistema existem multas para coibir sua propagação.

O fator de potência de cargas constituídas por lâmpadas incandescentes e resistores é praticamente unitário, desde que a indutância é desprezível em face da resistência. Por outro lado, em aplicações de lâmpadas fluorescentes compactas e motores de indução ele pode não chegar a 0,85 ou tão baixo quanto 0,4 se o motor estiver levemente carregado. Baixo fator de potência é uma característica indesejável em qualquer carga. Uma companhia de energia cuja carga tenha fator de potência de 0,5 está em posição equivalente a de uma loja de departamento com 50 % de devolução das mercadorias e desde que tudo tem de ser entregue em dobro antes de permanecer no cliente o custo de entrega também é maior. Por isso a demanda de energia reativa em excesso é cobrada do consumidor. A resolução 414 da ANEEL de 2010 estabelece a forma de cálculo e critérios para o faturamento de energia e demanda reativa. Hoje, no entanto a cobrança da energia reativa excedente está limitada a capacidade dos medidores disponíveis nas instalações.

A unidade consumidora com medição apropriada deve ter o faturamento correspondente ao consumo de energia elétrica e à demanda de potência reativa excedente calculada de acordo com as seguintes fórmulas (2.13 e 2.14):

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^{n} [EEAM_T * (\frac{f_R}{f_T} - 1)] * VR_{ERE} \quad (2.13)$$

$$D_{RE} = [\underset{t=1}{\overset{n}{MAX}} (PAM_T * \frac{f_R}{f_T}) - PAF_{(p)}] * VR_{DRE} \quad (2.14)$$

Onde:

$E_{RE}$ = valor correspondente à energia elétrica reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência "$f_R$", no período de faturamento, em Reais (R$);

$EEAM_T$ = montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo "$T$" de 1 (uma) hora, durante o período de faturamento, em megawatt-hora (MWh);

$f_R$ = fator de potência de referência igual a 0,92;

$f_T$ = fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo "$T$" de uma hora, durante o período de faturamento, observadas as definições dispostas nos incisos I e II do § 1º deste artigo;

- § 1º Para apuração do $E_{RE}$ e $D_{RE}$(p), deve-se considerar:
- I – o período de 6 (seis) horas consecutivas, compreendido, a critério da distribuidora entre 23h 30 min e 6h 30 min, apenas os fatores de potência "$f_T$" inferiores a 0,92 capacitivo, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora "$T$"; e
- II – o período diário complementar ao definido no inciso I, apenas os fatores de potência "$f_T$" inferiores a 0,92 indutivo, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora "$T$".

$VR_{ERE}$ = valor de referência equivalente à tarifa de energia "$TE$" da tarifa de fornecimento, em Reais por megawatt-hora (R$/MWh), considerando-se para os consumeidores livres o seu valor equivalente aplicável ao nível de tensão no qual a unidade consumidora estivar localizada;

$D_{RE}(p)$ = valor, por posto horário "p", correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência "$f_R$" no período de faturamento, em Reais (R$);

$PAM_T$ = demanda de potência ativa medida no intervalo de integralização de 1 (uma) hora "$T$", durante o período de faturamento, em quilowatt (kW);

*PAF(p)* = demanda de potência ativa faturável, em cada posto horário "p" no período de faturamento, em quilowatt (kW);

$VR_{DRE}$ = valor de referência equivalente às tarifas de demanda de potência das tarifas de fornecimento aplicáveis aos subgrupos do grupo A ou as TUS D - Consumidores - Livres, conforme esteja em vigor o Contrato de Fornecimento ou o CUSD, respectivamente;

MAX = função que identifica o valor máximo da fórmula, dentro dos parênteses correspondentes, em cada posto horário "p";

*T* = indica intervalo de uma hora, no período de faturamento;

p = indica posto horário, ponta ou fora de ponta, para as tarifas horossazonais e

n = número de intervalos de integralização "*T*", por posto horário "p", no período de faturamento.

O fator de potência é definido como a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétrica ativa e reativa, consumidas num mesmo período especificado de uma hora, segundo a resolução n° 414.

Existem unidades consumidoras cujo equipamento de medição não permite a aplicação das equações fixadas no artigo 96 da resolução 411, transcrito anteriormente. Nestes casos o artigo 97 indica as fórmulas para apurar os valores correspondentes à energia elétrica e demanda de potência reativa correspondente.

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^{n} [EEAM * (\frac{f_R}{f_M} - 1)] * VR_{ERE} \qquad (2.15)$$

$$D_{RE} = [\underset{t=1}{\overset{n}{MAX}} (PAM * \frac{f_R}{f_M}) - PAF] * VR_{DRE} \qquad (2.16)$$

As expressões 2.15 e 2.16 são similares às expressões 2.13 e 2.14, porém refletem a amostragem deficiente de certos equipamentos de medição, face as condições dispostas nesta resolução.

Nestes casos são considerados valores médios totalizados no período de faturamento, dessa forma as variáveis que mudam em relação às expressões (2.13 e 2.14) anteriores, são:

*EEAM* = montante de energia elétrica ativa medida durante o período de faturamento, em megawatt-hora (MWh);

$f_M$ = fator de potência indutivo médio da unidade consumidora, calculado para o período de faturamento;

$D_{RE}$ = valor correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência "$f_R$", no período de faturamento, em Reais (R$);
*PAM* = demanda de potência ativa medida durante o período de faturamento, em quilowatt (kW);
*PAF* = demanda de potência ativa faturável no período de faturamento, em quilowatt (kW);

A forma de a concessionária verificar o fator de potência deve ser feita por meio de medição apropriada observando os seguintes critérios:
A unidade consumidora do grupo A deve ser verificada de forma obrigatória e permanente e a do grupo B de forma facultativa, sendo admitida à medição transitória, desde que por um período mínimo de sete dias consecutivos.
Essas condições para o faturamento impõem um conjunto de restrições para a concessionária e para o consumidor, em função dos equipamentos utilizados para as medições, que hoje é reflexo do grupo A ou B.
Os consumidores do grupo A dispõem de medidores eletrônicos com capacidade de determinar os parâmetros necessários ao faturamento nas condições da resolução da ANEEL e com isso devem considerar a influência do fator de potência da instalação.
A medição do fator de potência de unidade consumidora do grupo B é facultativa e atualmente pode ser feita pela concessionária quando suspeita que haja algum problema com esse parâmetro. Isso implica em seguir os critérios de verificação transitória, ou seja, medição apropriada por um período de no mínimo sete dias.
Por outro lado em agrupamentos maiores de consumidores, tais como nos condomínios e ainda alguns consumidores residenciais, verifica-se que as concessionárias substituíram os medidores eletromecânicos pelos eletrônicos de modo que elas podem se beneficiar das disposições legais, com relação à cobrança de excedente reativo.
A composição da tarifa do ponto de vista dos parâmetros técnicos seria, em princípio transparente do ponto de vista da medição da energia derivada da potência ativa, ou seja, a energia efetivamente consumida para realizar trabalho.
Por outro lado e por se tratar de uma grandeza auxiliar, a potência reativa e por conseqüência a energia reativa traz consigo problemas conceituais na sua caracterização física.
A filosofia de cobrança estima para o excedente reativo um valor correspondente de consumo. O valor correspondente de consumo é calculado considerando uma carga ativa equivalente ao valor da potência aparente e deste valor se desconta a potência ativa consumida e se obtém o valor do excedente. Como princípio geral se considera um

hipotético consumidor do excedente, para efeitos de compensação financeira. Entretanto, em termos físicos não há transferência substancial de energia para o consumidor, pois os elementos reativos, quando muito apenas armazenam uma quantidade finita desse insumo.

Afora a questão física a multa cobrada é função do mau aproveitamento do sistema e visa incentivar o consumidor a melhorar a qualidade de seus equipamentos.

Na composição da tarifa para os consumidores enquadrados no artigo 96 se observa que os dados fornecidos para a energia ativa e reativa correspondem ao total "integralizado" no mês. A forma com que esses valores são estimados implica em uma tarifa para a qual o consumidor não possui todos os dados para verificar se o que está sendo cobrado é justo, e determinar as possíveis correções, pois os dados "integralizados" são fornecidos como um valor numérico que não pode ser conferido a partir dos números fornecidos na conta.

Por outro lado o fornecimento desses dados é apresentado no artigo 102 da resolução 414, como um serviço cobrável pela concessionária correspondente a disponibilização dos dados de medição armazenados em memória de massa.

## 2.6. A racionalização econômica utilizada de um ponto de vista técnico

A razão econômica fornece indicações básicas para as realizações técnicas. As determinações do nível de tensão de uma linha de transmissão e a seção econômica de um condutor utilizado em uma instalação são exemplos desse fato.

Em geral a racionalização econômica está embutida em muitas das regras aplicadas pelos técnicos e engenheiros em seus projetos.

Devido ao uso consagrado dessas regras, em muitos casos o técnico ou engenheiro parte de pressupostos que são assumidos como verdadeiros, mas, no entanto foram desenvolvidos para solucionar um problema específico. Isso é um fenômeno recorrente, pois existem muitas formas de se resolver um problema de engenharia do mesmo modo que existem muitas formas de análise, que variam em complexidade e alcance. Devido ao grande número de métodos aplicáveis, o profissional muitas vezes não atinge um nível de especialização suficiente para operar todos com o devido rigor e desvios podem ocorrer.

O problema da correção do fator de potência pode fornecer um bom exemplo das proporções que a análise pode assumir, pois envolve variável econômica e de engenharia para avaliar a viabilidade de uma solução. Nesta região de fronteira existem problemas de interpretação que se refletem na aplicação dos conceitos.

Iniciando pelo ponto de vista técnico, as expressões matemáticas da resolução 411 assumem alguns postulados normalmente aplicados em eletrotécnica para sistemas que funcionam com forma de onda senoidal. Por exemplo, a definição funcional de fator de potência assumida nesta resolução implica em considerar que a potência aparente corresponde à raiz quadrada da soma do quadrado das potências ativa e reativa, que deriva do triângulo de potências.

Conforme indicado no capítulo 4 a definição do valor da potência reativa não é trivial devido às diferenças na natureza das cargas envolvidas (reativos e cargas não lineares) de modo que é melhor conhecer o valor da potência aparente e da ativa para determinar o fator de potência.

Do ponto de vista tecnológico existem formas de se corrigir o problema que variam em função da natureza da carga conforme indicado no capítulo 4. A composição operacional de cargas pode atenuar o problema à medida que as cargas que apresentam problemas com relação ao fator de potência possam ser diluídas com cargas com maior fator de potência. Geralmente isso pode ser alcançado em combinações de cargas menores, por exemplo, as de iluminação com baixo fator de potência com cargas maiores com alto fator de potência.

As soluções de engenharia para problemas que envolvem variáveis econômicas dependem

Do ponto de vista econômico, segundo o manual de tarifação do Procel (17), em geral a correção do fator de potência é uma das medidas mais baratas de redução de despesa com energia elétrica. Mas isso nem sempre é verdadeiro, pois há que se verificar se a economia obtida com a despesa justifica o investimento.

Neste manual se sugerem a verificação das últimas 12 contas para comprovar se há cobrança de parcela relativa à demanda ou energia reativa. Se isso ocorrer com freqüência se recomenda procurar uma empresa especializada para a elaboração de um orçamento do serviço necessário à correção do fator de potência. De posse desse valor o documento do Procel sugere uma expressão para ser usada na comparação.

$$A = 0{,}17698 * P \qquad (2.17)$$

Onde:

$A$ é o valor de referência para comparação. Se for menor ou igual a soma do que foi pago nos últimos 12 meses como parcela reativa, vale a pena contratar o serviço de correção do fator de potência.

*P* é o valor orçado pelo serviço. (17).

A expressão é calculada com base no valor presente de uma série uniforme de dez pagamentos anuais, calculados à taxa de 12% ao ano.

Essas expressões simplificadas têm a virtude de auxiliar de maneira expedita à tomada de decisões, principalmente para o consumidor leigo (particularmente o residencial). Entretanto ela pode induzir ao erro pela forma em que é apresentada, pois não está claro o que está sendo comparado.

Essa expressão tem origem no cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) para vários fluxos de caixa *FC* futuros relacionados a *TIR* (Taxa Interna de Retorno).

Dessa forma a soma do que se pagou nos últimos 12 meses deve se relacionar ao excedente reativo, que é o ganho esperado. O valor do investimento deve ser pago em dez anos à taxa de 12% ao ano.

A expressão para o cálculo da TIR em função dos dados disponíveis é:

$$FC_t * \sum_{t=1}^{n} \frac{1}{(1+TIR)^t} = I_0 \qquad (2.18)$$

Onde:

$FC_t$ é o fluxo de caixa para t de 1 a $n$;

*TIR* é a Taxa Interna de Retorno que é aquela que iguala o valor presente de todos os fluxos de caixa futuros com o investimento inicial resultando em um VPL=0 e foi definida como 0,12 (ou 12% ao ano);

$t$ é o período considerado, ou seja, o ano referido (ano 1, ano 2, ano 3, etc.);

$n$ é o número de períodos que se espera o retorno do investimento, no caso 10 anos e

$I_0$ é o investimento inicial em t=0.

O termo $\sum_{t=1}^{n} \frac{1}{(1+TIR)^t}$ da expressão 2.17 a partir dos dados disponíveis é calculado por:

$$\frac{1}{(1+0,12)^{10}} + \frac{1}{(1+0,12)^{9}} + \frac{1}{(1+0,12)^{8}} + \frac{1}{(1+0,12)^{7}} + \frac{1}{(1+0,12)^{6}} + \frac{1}{(1+0,12)^{5}} + \frac{1}{(1+0,12)^{4}} + \frac{1}{(1+0,12)^{3}} + \frac{1}{(1+0,12)^{2}} + \frac{1}{(1+0,12)^{1}} = 5,65 \qquad (2.19)$$

Com isso a expressão 2.18 se torna:

$$FCt = I_0 * 0,17698 \qquad (2.20)$$

Comparando as duas expressões 2.17 e 2.20 constatamos que o investimento inicial $I_0$ corresponde ao valor orçado pelo serviço $P$. O valor de $A$ é associado ao fluxo de caixa $FC_t$. e corresponde ao gasto anual com o excedente reativo. Para que a contratação do serviço de correção do fator de potência seja vantajosa economicamente é necessário que o valor de $A$ seja menor do que o valor pago nos últimos doze meses como excedente reativo.

Essa constatação varia em função das premissas assumidas como aceitáveis para definir a vantagem econômica: o valor da taxa de retorno e a série uniforme de dez pagamentos anuais. Essas duas variáveis não levam em conta o benefício proporcionado pelo investimento, uma vez que o trabalho realizado não é levado em conta, pois não existe nenhuma variável para quantifica-lo.

Outras formas de avaliação podem levar em conta maior número de variáveis para um estudo que envolve a tecnologia empregada para solucionar o problema, o benefício esperado, além das variáveis econômicas.

Do ponto de vista tecnológico a correção do fator de potência de cada equipamento é uma forma relativamente simples do ponto de vista do controle.

As cargas lineares, geralmente indutivas precisam de capacitores calculados especificamente para compensação de reativos. Já as cargas não lineares na maioria das vezes precisam de filtros para a correção do fator de potência que podem ser passivos ou ativos.

Os filtros passivos são mais simples, porém não se adaptam bem a variações nas condições da carga. Os filtros ativos são mais complexos e sofisticados e por isso se adaptam melhor a variações na carga, porém são mais caros.

A aplicação desses filtros varia, portanto em função da solução técnica mais econômica o que implica na compreensão da tecnologia e da análise econômica do projeto. O capítulo 4 apresenta os métodos para correção do fator de potência, bem como a filosofia de análise das alternativas técnicas.

As análises econômicas do investimento envolvem diversas variáveis, sendo que as variáveis físicas como a potência ou a energia deve se traduzir em custos. Isso geralmente envolve o custo da energia em unidades monetárias por kilowatt-hora, ou outras unidades similares na razão capital investido sobre trabalho produzido.

Com isso, a solução a ser adotada se baseia em fatores técnicos e econômicos simultaneamente que interagem para determinar a melhor escolha em função das circunstâncias encontradas.

Por exemplo, partindo-se da premissa arbitrária de que a melhor solução para a correção do fator de potência em uma instalação com uma lâmpada fluorescente compacta de 15W é o

filtro passivo LC formado por um reator e um capacitor, conforme descrito no capítulo 4, é possível se calcular o custo anual da instalação normal e com correção para efeito de comparação.

Devido à disseminação dos computadores, atualmente é possível elaborar planilhas eletrônicas que contém um raciocínio complexo a partir de alguns dados relativamente simples de entrada.

Além dessa aplicação, esses programas que podem operar com matrizes de dados também são utilizados para processar as informações obtidas dos consumidores, através dos medidores inteligentes.

Independente da aplicação, que pode ser uma avaliação específica como neste exemplo ou uma análise de dados de consumo em massa existe a necessidade de se elaborar algoritmos para os computadores. Nesse cenário o processo pelo qual os trabalhos em engenharia são desenvolvidos é adequado para a elaboração desses algoritmos que são fundamentais em todos os níveis de automação de uma rede inteligente.

Em um artigo do AIEE (20), com título “Mathematics and Physics in Engineering”, publicado em 1939, Michel G. Malti discute sobre a formação dos engenheiros com respeito à matemática e a física.

Ao iniciar a exposição e para estabelecer a argumentação ele descreve de maneira sucinta a forma de raciocínio para a resolução dos problemas de engenharia:

1. Reduzir seus problemas de engenharia a fatos físicos fundamentais. Fazer o esquema dos problemas de engenharia representando todas as variáveis de interesse.
2. Expressar os fatos físicos na forma matemática. Examinar as teorias em busca de expressões matemáticas que permitem calcular as relações entre as variáveis de interesse. Aplicar a teoria na resolução do problema.
3. Deduzir dos enunciados matemáticos o resultado desejado. Resolver as equações matemáticas.
4. Interpretar o resultado matemático fisicamente.

Destes itens, somente o terceiro é algo que o engenheiro não precisa necessariamente dominar, desde que ele pode contar com matemático ou até alguns programas de computador.

O exemplo da correção do fator de potência da lâmpada fluorescente compacta pode ser utilizado para ilustrar a aplicação desses passos.

O primeiro passo é reduzir os problemas de engenharia em fatos físicos fundamentais que inclui a descrição do problema e a condição para sua solução.

O problema consiste em determinar se a correção do fator de potência é vantajosa economicamente pela comparação de uma instalação com e sem filtro, sendo utilizada uma planilha eletrônica para automatizar o processo e torna-lo mais flexível.

Nesta planilha investigaremos as vantagens da correção do fator de potência em uma instalação simples de iluminação, pela comparação do custo para produção de luz. (21)

A dimensão calculada será o custo do lúmem-hora que é parâmetro comum adotado para a comparação de várias tecnologias de iluminação.

No segundo passo que é expressar os fatos físicos na forma matemática se examinam as teorias em busca de expressões matemáticas que permitem calcular as relações entre as variáveis de interesse. Nesse caso as variáveis físicas representam apenas quantidades de um bem de consumo quantificáveis e representáveis financeiramente através de um preço que deve ser otimizado buscando a solução mais econômica.

No problema apresentado se quer calcular o custo da luz utilizando o mesmo sistema de iluminação, porém adotando uma solução técnica para um problema tecnológico. O custo da luz foi definido como a relação entre o custo anual da instalação, em dólar, e o número de lumens-hora gerados no mesmo período. Isso define que a única finalidade do investimento é a produção de luz. Devido às quantidades envolvidas a unidade de referência é US$/Mlm.h, ou seja, dólares por milhão de lumens-hora.

Para isso devem ser analisados os custos relacionados à instalação e operação do sistema de iluminação que compreendem os custos de investimentos, da energia e da manutenção.

$$CT = CI + CE + CMO \qquad (2.20)$$

Onde:

$CI$ são os custo de investimentos;

$CE$ é o custo da energia e

$CMO$ são os custos de manutenção.

Depois de ter reduzido os problemas de engenharia a fatos físicos fundamentais, que é o primeiro passo, o engenheiro dispõe das grandezas físicas necessárias à análise, como a potência e o fluxo luminoso. Além disso, sabe dos custos associados aos componentes necessários e por isso está pronto a expressar os fatos físicos na forma matemática, que é esta etapa.

Para isso é necessário o conhecimento dos modelos matemáticos adequados e a pesquisa é aplicada para a obtenção das respostas.

Neste caso a pesquisa leva a matemática financeira e suas definições. O custo de investimentos é dado pelo investimento vezes o fator de recuperação de capital, dividido pelo número de lumens-hora.

O fator de recuperação de capital calcula o equivalente ao investimento que seria gasto durante o ano levando em conta a taxa de desconto (remuneração do capital). O FRC é dado pela expressão:

$$FRC_i = \frac{r}{1-(1+r)^{-Ni}} \quad (2.21)$$

Onde:

r é a taxa de desconto em % ao ano, convertida a decimal;

Ni corresponde à vida útil dos componentes instalados, dado em anos, e i se refere aos vários componentes.

Para o cálculo de N relativo às lâmpadas se aplica:

$$N_i = \frac{Vu_i}{hd * 365} \quad (2.22)$$

Onde:

$Vu_i$ é a vida útil do componente (por exemplo, a lâmpada) em horas e

hd é o número médio de horas diárias de utilização do componente.

Assim, o custo unitário devido a cada um dos investimentos $I_i$ será dado por:

$$CI = \frac{\sum I_i * FRC_i}{\Phi} \quad (2.23)$$

O valor de ϕ introduz um operador matemático da energia luminosa para quantificar o serviço energético útil. A unidade é Mlm.h (mega-lúmen hora).

A quantidade de (mega) lúmen-hora produzida no ano é dada por:

$$\Phi = \frac{(P_e + \mathrm{P_r}) * E_{fn} * hd * 365}{10^6} \quad (2.24)$$

Onde:

$P_e$ é a potência da lâmpada utilizada, em W;

$P_r$ é a potência reativa equivalente, em W. Corresponde ao valor do excedente reativo derivado da expressão do FER. Se o fator de potência FP do aparelho de iluminação é inferior a 0,92 equivale a:

$$\mathrm{P_r} = \frac{0{,}92}{FP} - 1 \quad (2.25)$$

Se o valor de *FP* é maior que 0,92 a potência reativa equivalente é igual a zero;

$E_{fn}$ é a eficácia da conversão luminosa, em lm/W e

$F_D$ é o fator médio de depreciação do fluxo luminoso.

O custo de energia, *CE*, considera o consumo de energia relativos à demanda de potência da lâmpada e a potência reativa equivalente.

$$CE = \frac{T}{E_{fn} * FD * 10^6} \qquad (2.26)$$

Onde:

$T$ é o preço da tarifa de energia elétrica, em US$/Wh;

$E_{fn}$ é a eficácia da conversão luminosa, em lm/W;

$FD$ é o fator médio de depreciação do fluxo luminoso.

O custo de manutenção pode ser calculado por:

$$CM = \frac{\sum A_i * V_i}{\Phi} \qquad (2.27)$$

Onde:

$A_i$ é o número de horas gasto nas atividades de limpeza, inspeção, em horas de serviço anual;

$V_i$ é o valor unitário da atividade, em US$/h.

No terceiro passo o engenheiro pode contar com o auxílio matemático de uma planilha eletrônica para deduzir dos enunciados matemáticos o resultado desejado.

Esse passo é exigente na aplicação da lógica matemática, porém os resultados podem ser muito úteis em aplicações futuras.

No caso da correção do fator de potência, utilizado no exemplo, se estimou o uso de uma lâmpada fluorescente compacta de 15W, montada em uma luminária de embutir com vidro fosco temperado, conforme a figura a seguir.
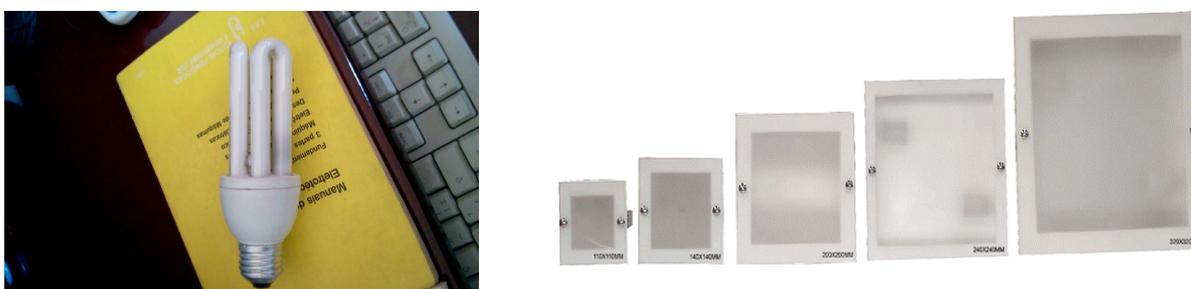
**Figura 2.7 - Componentes da instalação considerados para a aplicação do modelo matemático**
Fonte: [Internet e autoria própria]

Conforme observado no modelo matemático existe um grande número de variáveis envolvidas que seriam mais bem descritas através de extratos da planilha.

Tabela 2.5 – Resultados da análise técnica e econômica do caso

| Fluorescente compacta | vida lâmpada (h) | vida do reator (h) | vida da luminaria (h) | serviço/ lumens (lm) | potencia lâmpada (W) | potencia equivalente reativa (W) | custo da lâmpada US$ | custo do reator US$ | custo da luminária US$ | eficiencia (lm/W) | Fator de potência |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sem filtro | 7500 | 20000 | 50000 | 975 | 15 | 12,6 | 4,16 | 0,00 | 29,47 | 35 | 0,50 |
| Com filtro | 7500 | 20000 | 50000 | 975 | 15 | 0 | 4,16 | 7,90 | 29,47 | 65 | 0,98 |

| | Fluorescente compacta | Fluorescente compacta com filtro |
|---|---|---|
| **LAMPADA** | | |
| Nj | 4,11 | 4,11 |
| FRC | 0,32 | 0,32 |
| **REATOR** | | |
| Nj | 10,96 | 10,96 |
| FRC | 0,17 | 0,17 |
| **LUMINARIA** | | |
| Nj | 27,40 | 27,40 |
| FRC | 0,13 | 0,13 |
| **GERAL** | | |
| S | 1,51 | 1,51 |
| Ci | 3,33 | 4,22 |
| Ce | 5,00 | 2,71 |
| Cm | 0,000 | 0,000 |
| CT | 8,33 | 6,93 |

Foram consideradas também as seguintes condições de uso e de custos.

Tabela 2.6 – Condições de uso e custos

| | |
|---|---|
| **fator de depreciação** | **0,85** |
| **taxa de desconto** | **0,12** |
| **utilização (horas/dia)** | **5** |
| **custo de manutenção** | **0** |
| **preço da energia (US$/Wh)** | **0,00015** |

Isso leva ao último passo que é interpretar o resultado matemático fisicamente.

Neste caso simples foram contabilizados todos os custos em um modelo matemático que se traduziu em uma planilha eletrônica e que se resume no valor de *CT*. No caso do exemplo a solução através da correção do fator de potência é justificável em face da redução do custo.

Por outro lado as condições de uso, as variáveis econômicas e outras podem variar, mas como o processo foi automatizado e desde que se possa aceitar o modelo é possível se adaptar às circunstâncias de maneira mais rápida e eficaz.

Embora esse exemplo não tenha um caráter essencialmente dinâmico ele ilustra as possibilidades de agregar variáveis econômicas e físicas em um sistema integrado visando à tomada de decisões, que é base de um sistema de automação.

No entanto se o sistema empregado para a correção do fator de potência apresentasse algum desgaste, o que incorreria em custo de manutenção, poderia ser vantajoso não utiliza-lo em determinados períodos. Por exemplo, se o custo da energia fosse um quinto do considerado inicialmente e se o custo de manutenção envolvesse a troca de um filtro, o valor de CT seria favorável à condição sem filtro. Isso poderia ser facilmente implementado através um contato em paralelo acionado por um relé programável que anularia a ação do reator em função da possível sinalização de custo via rede inteligente.

Nesses casos se deduz que tais variáveis poderiam ser incorporadas aos sistemas de medição e controle de maneira similar às variáveis físicas tradicionalmente utilizadas.

Os passos para elaboração não devem diferir muito dos quatro citados anteriormente. O segundo passo é o que introduz a pesquisa no sistema, pois ao expressar os fatos físicos na forma

matemática se deve examinar as teorias em busca de expressões matemáticas que permitem calcular as relações entre as variáveis de interesse. Nesse aspecto devido aos meios para aquisição de informações disponíveis atualmente a dinâmica e volume do processo adquiriram proporções massivas. Não obstante, desde que os princípios sejam mantidos haverá a possibilidade de evolução real dos sistemas integrados o que inclui a chamada rede inteligente e suas conseqüências.

## 3. AUTOMAÇÃO DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS E SUA RELAÇÃO COM A REDE INTELIGENTE (SMART GRID).

A energia elétrica recebida pelo consumidor está sujeita às restrições legais e técnicas de um sistema que já está bem sedimentado no modelo atual. Entretanto, com a evolução projetada para as redes elétricas haverá mudanças fundamentais na forma de iteração entre as concessionárias e os consumidores definida pela estrutura das redes futuras.

Espera-se que em um futuro próximo o consumidor seja envolvido na cadeia de controle pela chamada rede inteligente que tem a capacidade de trocar informações e energia de modo bi-direcional. A rede inteligente teria então a capacidade de coordenar o intercâmbio de energia e informações de modo a otimizar o aproveitamento das fontes de energia, como parte dos recursos disponíveis. Além disso, ela teria a capacidade de otimizar o desempenho das funções de proteção minimizando a conseqüência das falhas ou atuando de maneira preventiva e dessa forma maximizaria a confiabilidade do sistema.

Obviamente não se pode desprezar as redes existentes e o que ocorre é uma evolução de dispositivos, técnicas e sistemas cujo resultado final será a rede inteligente.

Atualmente, a voga no que diz respeito a redes inteligentes se refere às características que permitem o gerenciamento do sistema. Nesse aspecto a rede é constituída por vários elementos para transmissão, proteção e controle da energia que incorporaram a possibilidade de trafegar informações em tempo real entre eles sendo capazes de agir de forma coordenada no sistema elétrico. Dessa forma se percebe a rede inteligente como um meio coordenador através do qual os consumidores e geradores se relacionam.

Esse princípio coordenador não é totalmente novo já que é fundamental para o sistema de transmissão interligado, que interliga os geradores e os centros de consumo, para os quais existem regras para acesso ao sistema e a coordenação é imprescindível. A função de coordenar as empresas na transmissão é exercida pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), que dispõe de meios para controlar o fluxo da energia em todo o país.

Trata-se, portanto de disseminar a aplicação dos princípios de controle no sistema de distribuição, posto que em um futuro próximo esse sistema passará a congregar a geração distribuída de fontes alternativas. Nesse caso o sistema de distribuição se pareceria com um micro-cosmo do sistema de transmissão e embora o princípio

motivador seja similar a aplicação deve ser diferenciada devido ao porte dos empreendimentos.

Enquanto o sistema de transmissão coordena empresas com um aparato técnico de porte significativo, no sistema de distribuição a coordenação seria feita em vários pequenos empreendimentos com aparato técnico modesto e o controle deve ser feito preferencialmente por sistemas automáticos que trabalham em conjunto coordenados. Esses sistemas teriam a capacidade de operar coordenados pela rede inteligente e teriam embutido em sua lógica interna os elementos técnicos necessários a operação autônoma, dispensando o controle constate de um especialista.

O conceito de residência inteligente (do inglês “smart home”) então, tornaria acessível ao consumidor e futuramente produtor residencial, as operações técnicas mais complexas, ao colocar-se como um aplicativo amigável que serve de meio intermediário entre o sistema e o operador humano.

O trabalho mais complexo seria criar esses sistemas especialistas que tivessem a capacidade de gerir o trabalho técnico operacional com segurança e eficácia, porém com a capacidade de interagir com os usuários de maneira amigável.

Nesse cenário, a filosofia do projeto encontra maior afinidade com o controle de grandes plantas industriais feito por sistemas de supervisão e gerenciamento automáticos, do que com o sistema de transmissão nacional, por exemplo.

Colocando-se desse modo se percebe que a base do que se conhece por rede inteligente não é necessariamente algo novo, como alguns poderiam supor, mas sim a aplicação inteligente de vários componentes e sistemas já existentes, visando à automação e o controle remoto da rede de distribuição. Indo além a rede inteligente também visa congregar os diversos participantes do sistema de distribuição, coordenando suas atividades energéticas, o que pode permitir a otimização do aproveitamento da capacidade disponível em função do tempo.

Na base dos conceitos associados à rede inteligente se pode distinguir algumas premissas:

- A rede inteligente é a base para a evolução do sistema de distribuição de energia elétrica.
- A rede inteligente agiliza o gerenciamento da demanda e através deste é possível otimizar a utilização do sistema de modo a postergar o investimento no aumento de sua capacidade.
- A rede inteligente permitirá a incorporação da geração distribuída.

- A rede inteligente permite aumentar a estabilidade dos sistemas elétricos.

A validade dessas premissas é motivação para estudo em função das muitas variáveis e interesses envolvidos, entretanto já se desenvolvem trabalhos nesse sentido e existem tecnologias e métodos desenvolvidos para atender outras necessidades que podem contribuir com a evolução das redes. Uma observação mais cuidadosa permite compreender melhor essas relações e verificar essas premissas.

### 3.1 Princípios e características das redes inteligentes.

Uma rede inteligente é caracterizada por uma estrutura de tecnologia da informação de alto nível, que pode transmitir energia e informação ao menos no modo bidirecional, do usuário para o sistema e vice versa.

Para compreender os princípios e características essenciais hoje associados à rede inteligente é necessário definir sua importância como plataforma sobre o qual tanto a geração de energia elétrica atual como o potencial aumento produzido por fontes renováveis descentralizadas será fundamentado.

A partir dessa perspectiva, o Comitê “Intelligrid” do EPRI (Electric Power Research Institute) desenvolveu uma visão pioneira para o fornecimento de energia elétrica ano futuro, apontando os elementos básicos e principais características dessa plataforma:

- Interatividade: Com a finalidade de obter o melhor desempenho econômico do sistema, é obrigatório conceder ao usuário ampla visão e pleno acesso às tarifas de energia, possibilitando a resposta à demanda, representada pela variação dos preços das tarifas.
- Capacidade de adaptação: Uma rede inteligente deve se adaptar às mudanças do ambiente circundante, que podem exercer influência sobre ela, tendo inclusive a capacidade de auto-recuperação pelo re-direcionamento de seus recursos.
- Previsibilidade: Uma rede inteligente não tem somente a capacidade de adaptação e correção de eventos, mas também é capaz de diagnosticar situações de risco potencial antes que efetivamente ocorram.
- Otimização: No que diz respeito à eficiência básica do sistema, a rede inteligente tem meios para otimizar o nível de utilização da capacidade instalada. Através de monitoração contínua, previsibilidade já mencionada e controle pela interatividade o sistema pode racionalizar o uso de seus ativos, reduzindo as

perdas de modo a postergar investimentos destinados à construção de novas plantas.

- Integração: As redes inteligentes devem reunir sistemas de monitoramento, controle, proteção e manutenção, além de funções avançadas como EMS (Energy Management System) e DMS (Distribution Management System).
- Segurança de dados: Uma rede inteligente, assim como qualquer sistema baseado na tecnologia da informação, deve garantir a segurança dos dados que por ela trafegam.

## 3.2 Tecnologias de automação disponíveis para suporte de redes.

O suporte técnico para uma rede com as características apontadas pelo “Intelligrid” está em princípio disponível, pois foi desenvolvido para atender necessidades de automação já existentes na indústria. Por outro lado alguns elementos desses sistemas podem ser aplicados às instalações residenciais. Esse suporte pode ser constituído dos seguintes elementos disponíveis no mercado:

- Sistemas SCADA
- Sistemas de comunicações
- Sistema de medição baseado em medidor inteligente (smart meter)
- Sistema de proteção

### 3.2.1. Sistemas SCADA

Com o crescimento da indústria e o aumento na sofisticação do controle dos processos a quantidade de informação vinda de sensores espalhados pela planta industrial tornou muito complexa a atividade de gerenciar os sistemas.(23)

Os primeiros sistemas para controlar esses processos eram simplesmente sistemas de telemetria, onde sensores eram colocados em campo e se ligavam diretamente a medidores onde os operadores poderiam acompanhar em tempo real os valores e tomar decisões baseados nessas medidas. Isso se constitui no primeiro tipo de sistema SCADA, utilizado pela indústria.

A sigla SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), significa controle supervisor e aquisição de dados sendo o nome dado ao sistema que faz a aquisição dos

dados em campo, os supervisiona e permite ao operador controlar ou decidir com base nessa informação.

A evolução, difusão e barateamento dos sistemas computacionais permitiram que a tecnologia SCADA além do acesso aos dados dos sensores, também possa executar comandos remotos, verificando os valores de campo e chamando a atenção para os mais críticos através de alarmes visuais ou sonoros.

O sistema SCADA é muito utilizado na indústria petroquímica, na geração e na distribuição de energia, controle de água e efluentes, sistemas de transporte, dentre outros. Em resumo esse sistema pode ser utilizado em empresas que precisam monitorar suas instalações e essas possuem dimensões muito grandes. Essas dimensões vão desde centenas de metros a vários quilômetros de distância, pois nesta situação somente um sistema automático pode colher em tempo hábil todos os dados necessários de uma grande quantidade de sensores e concentrar tudo isso em um só lugar permitindo a tomada de decisão por parte do operador do sistema.

O sistema SCADA possui três funções básicas:

- Função de supervisão: Inclui toda a função de monitoramento dos dados adquiridos em campo, verificação da faixa de valores e exibição desses dados. Essa exibição inclui as telas gráficas, os gráficos de tendência, as variáveis analógicas e digitais, acionamento de alarmes, os relatórios, etc.
- Funções de operação: Inclui a ação direta sobre elementos em campo tais como relés, atuadores pneumáticos e outros sendo capaz de enviar comandos como ligar, desligar e alterar parâmetros.
- Funções de controle: Alguns sistemas possuem rotinas específicas para atuação automática em determinadas situações de acordo com a necessidade e possibilidade de haver esse tipo de resposta, em princípio independente do operador. Isso é feito através de alguma linguagem de programação própria para controle, mas isso em muitos casos é desaconselhável e em particular em processos complexos e de grande responsabilidade.

O sistema SCADA utiliza o conceito de programação voltada a objetos, no qual os elementos são identificados por variáveis de controle da mesma forma que suas

propriedades, definem seu comportamento. Por exemplo, um botão colocado em uma interface homem máquina pode ser identificado como botão um. Esse botão 1 possui atributos que são as propriedades do tipo cor, tamanho, posição e pode ser programado para executar determinada tarefa quando acionado. Esse acionamento pode ser por clique de mouse, sonoro, etc. Dessa forma se compreende que no sistema SCADA, os dispositivos são considerados como elementos virtuais que possuem nome e propriedades e esses podem ser alterados em função das necessidades do operador. Existe no mercado uma grande quantidade de programas e sistemas computacionais para operar nessas condições que vão desde o clássico Visual Basic da Microsoft até sistemas mais específicos para programação instrumental como o Labview da National. A vantagem dos mais específicos é contar com uma biblioteca de instrumentos pronta para certas aplicações de modo a facilitar a programação dos objetos.

A opção por um programa em relação ao outro depende dos recursos disponíveis e da compatibilidade dos medidores utilizados. O trabalho de programação e montagem do sistema consiste no ajuste das propriedades dos objetos e programação das funções específicas, onde necessário.

Os elementos físicos do sistema SCADA se confundem com sua contraparte virtual nos programas devido ao relacionamento estreito entre eles. A programação voltada a objetos descreve os componentes do sistema por suas propriedades levando ao conceito de instrumentos virtuais (mais conhecidos pela sigla em inglês V.I. ou Virtual Instruments).

Dessa forma a arquitetura do sistema SCADA abrange os sistemas de controle, comunicação e os atuadores.

No inicio esses sistemas operavam com relés e transdutores analógicos, mas com o desenvolvimento da capacidade dos dispositivos computacionais e sua disseminação no ambiente industrial, a lógica SCADA foi embutida nos equipamentos. Um exemplo disso é o CLP (controlador lógico programável) que é muito utilizado na indústria para controle de equipamentos.

O sistema SCADA basicamente é constituído por um computador principal denominado Unidade Terminal Mestre (UTM) que se conecta a várias Unidades Terminais Remotas (UTR). As UTR são responsáveis pela aquisição dos dados dos sensores em campo e pelo comando de equipamentos. Além disso, as UTR enviam os dados dos sensores para a UTM.

A UTM tem a função de receber os dados das UTR, processa-los e se houver algum evento expressivo emitir alarmes ou executar comandos pré-programados correspondentes.

A apresentação dos dados para o operador através do computador também faz parte do sistema e constitui a Interface Homem Máquina (IHM).

Ao contrário do que se pode pensar, o sistema SCADA não é uma solução completa. Na realidade ele é um sistema integrador de soluções que ajuda na organização dos vários elementos na medida em que cria um ambiente comum no qual eles podem interagir como objetos virtuais compatíveis. Para isso cada objeto deve ser configurado sendo estabelecido então um protocolo de comunicação que corresponde a uma interface entre o dispositivo (UTR ou UTM) e o sistema. Por isso a implantação e manutenção de um sistema SCADA atualmente não é trivial, primeiramente devido à rede de comunicação de dados, instalação e configuração das UTR em campo, protocolo de comunicação entre UTR e UTM, ou seja, é um sistema adequado a várias aplicações, mas é necessária a participação de vários tipos de profissionais de várias áreas diferentes para implanta-lo, porém os benefícios que se adquire pode justificar o investimento.

Para citar um exemplo do problema da instalação e configuração de UTR para o sistema de rede inteligente, estimava-se em 2010 que o Brasil possuía sessenta e três milhões de medidores analógicos e a instalação dos medidores inteligentes “smart-meters” poderia ser feita em um período de dez anos, segundo estimativas da Aneel. Isso corresponde à instalação de aproximadamente dezessete mil medidores por dia.

Sendo um sistema no qual o “software” e “hardware” estão intimamente ligados o sistema SCADA também sofre com problemas de suporte computacional. Existem dois grupos de programas que são os proprietários e os livres. Geralmente os proprietários são desenvolvidos pelos fabricantes dos dispositivos sendo necessário, muitas vezes se adquirir o sistema completo de um fornecedor. Por outro lado os programas livres que utilizam protocolos padrão possibilitam a utilização de UTR fornecidas por fabricantes diferentes causando maior liberdade de escolha seguindo critérios funcionais e de preço.

Com a arquitetura livre existe a possibilidade de se contratar profissionais sem vínculos com o fornecedor do equipamento, o que representa um ganho em autonomia, porém existe o risco de falta de suporte técnico a médio e longo prazo.

### 3.2.2. Sistema de comunicação

Quando se planeja a implantação de um sistema SCADA se deve considerar a utilização da rede de dados já existente na empresa a fim de evitar custos adicionais com infra-estrutura de comunicação. Deve se considerar a utilização de qualquer rede local de computadores, conexão a rádio ou qualquer outra já existente, devendo-se tomar cuidado para que o sistema SCADA não interfira negativamente na rede existente.

Nesse particular, para aplicação com redes inteligentes de distribuição de energia se projeta a necessidade de maior conectividade, posto que a área de abrangência é vasta e os ambientes e sistemas locais variam muito de usuário a usuário.

A informação em uma rede inteligente que trafega nos dois sentidos é usada para coordenar um sistema inteligente de consumo de potência exige muito da rede de comunicação, pois implica no tráfego de informações relacionadas ao consumo dos usuários e ao controle de seus equipamentos inteligentes (24).

Do lado remoto o uso de fibras óticas FTTH (fiber to the home) se torna uma tendência, enquanto que a comunicação sem fio e a comunicação pela linha de potência PLC (power line communication) são os meios primários para comunicação local.

A comunicação sem fio tem vantagens como alto índice de sucesso, taxa de comunicação segura, instalação e manutenção fáceis. Todavia, sua vulnerabilidade a interferência, associado ao fato de que a qualidade da comunicação e a distância serem afetadas por paredes no uso interno. Além disso, o sinal da rede sem fio pode não estar disponível devido a vários tipos de restrição. Portanto, a tecnologia de rede sem fio não é uma opção ótima em larga escala. (24)

Independente do meio de comunicação (PLC, sem fio) todos tem limitações que fazem com que um seja melhor que o outro em função do local da instalação.

Esses sistemas evoluíram a partir da comunicação entre instrumentos de laboratório desenvolvidas em plataformas do tipo GPIB (General Purpose Interface Bus) RS232, RS485, para automação industrial.

Atualmente existem redes locais desenvolvidas para aplicação residencial como a “zigbee” que possibilita a comunicação entre os utensílios e elementos de controle da instalação elétrica no sistema conhecido como “smart home”. O desenvolvimento desse tipo de rede tem englobado a parte de medição pelo fato da energia ser um insumo

importante nas residências. Dessa forma existem sistemas desenvolvidos para esse tipo de rede aplicados na rede inteligente.

Devido ao fato de existir um grande número de soluções em função do grande número de interessados, não existe um consenso sobre a melhor alternativa, o melhor padrão.

Isso é um complicador para a aplicação em um sistema de medição do tipo “smart meter” que envolve muitos medidores (em 2011 era estimado 68 milhões no Brasil) (25) cuja operação de atualização envolve muito tempo e recursos (se estima que levaria 10 anos). (25).

Uma alternativa viável e adotada por fabricantes de medidores é dota-los de uma porta de comunicação industrial do tipo RS485 para conecta-los a uma rede a ser definida, através de um adaptador (modem) específico. Isso permite a instalação dos medidores com flexibilidade para se adaptar ao tipo de rede de comunicação e longevidade para a aplicação, pois a freqüência de troca não é tão elevada face ao parque instalado.

Ainda assim o tempo de troca de todos os medidores não pode ser desprezado e estratégias em longo prazo devem ser aplicadas. Na tarifa branca se prevê o escalonamento dos consumidores segundo seu consumo mensal, de forma que existem aqueles cuja troca é inviável, optativa ou compulsória, de acordo seu consumo mensal. Para os de menor consumo não haveria a necessidade da troca em um primeiro momento.

Do lado das subestações a norma IEC61850 para automação de subestações contempla dispositivos que operam com base na comunicação serial. (26). A figura a seguir ilustra diversas configurações de protocolos de comunicação existentes no mercado.
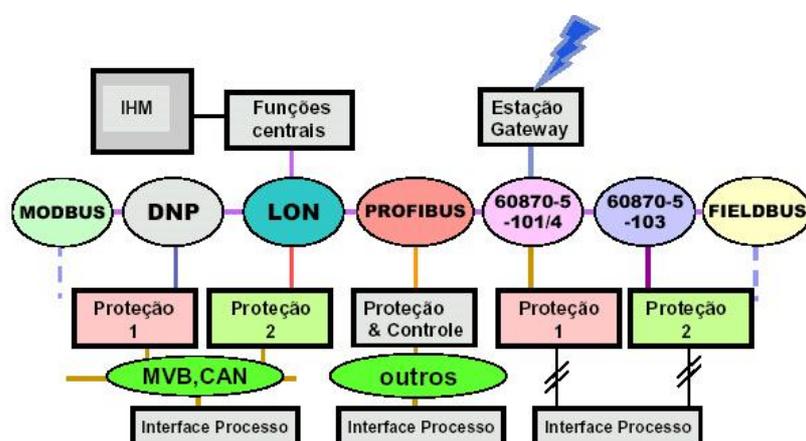
**Figura 3.1 - Protocolos de comunicação.**
Fonte: (SANTOS, L.F.,2007)

### 3.2.3. Sistema de medição

Muitas tecnologias concorrem dentro do sistema SCADA para o funcionamento do sistema de medição. Existe uma infinidade de transdutores e atuadores específicos às suas funções que transformam uma magnitude física qualquer em um valor elétrico mensurável.

No caso da rede elétrica trata-se apenas de um condicionamento de um sinal do ponto de vista da compatibilidade dos instrumentos e da segurança de operação.

Embora a operação básica seja aparentemente simples a aplicação exige um bom conhecimento dos conceitos associados aos sistemas de medição, começando pelas definições básicas sobre a avaliação da demanda até o aspecto relacionado às tecnologias disponíveis. Os capítulos 4 e 5 abordam respectivamente a avaliação da demanda e as tecnologias dos medidores.

### 3.2.4. Sistemas de proteção.

O aporte necessário à implantação dos sistemas inteligentes é vulnerável como toda cadeia de recursos tecnológicos às inevitáveis falhas provenientes de fatores naturais, erros humanos e até sabotagem. Isso é ainda mais preocupante se consideramos que essas redes inteligentes são baseadas em cadeias tecnológicas sobrepostas, cuja falha de um elemento pode disparar uma série de eventos nocivos.

Além disso, o próprio conceito de rede inteligente traz dentro de si elementos para integrar os sistemas de proteção e assegurar a confiabilidade do sistema, o que implica no desenvolvimento de algoritmos e programas para lidar com as situações adversas.

Disso se deduz que o assunto é vasto, pois engloba diversas frentes, desde a automação de subestações até automação de um simples utensílio doméstico.

Como existem muitos interessados as soluções são apresentadas por cada um deles segundo seu interesse. Por outro lado à evolução dos equipamentos normalizados e das normas pode contribuir para o processo como elemento orientador.

Existem quatro normas brasileiras que estão relacionadas com as redes de médias e baixas tensões e com as respectivas instalações elétricas (27), são elas:

- NBR5410: Instalações elétricas de baixa tensão;
- NBR14039: Instalações elétricas de média tensão;
- NBR5419: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas e

- NR10: Segurança em instalações e serviços em eletricidade

A NBR5410 é a norma aplicada a todas as instalações elétrica com tensão nominal inferior a 1000V em corrente alternada e 1500V em contínua. A abrangência desta norma influencia grande parte dos elementos da rede inteligente, pois cobre as instalações residenciais, comerciais, de uso público, industrial, agropecuário, pré-fabricadas, reboques de acampamento, etc. Esta versão cobre boa parte das questões envolvendo o dimensionamento da rede e a segurança dos dispositivos nela instalados servindo como uma ótima referência na elaboração do projeto básico das redes. Entretanto, como existem muitos elementos ainda não consolidados associados aos conceitos das redes inteligentes essa norma deve evoluir à medida que as estruturas forem consolidadas.

Outra norma de grande alcance para as redes inteligentes é a NBR14039 que cobre as instalações elétricas de média tensão de 1 a 36,2kV. Essa norma estabelece as condições mínimas de projeto e execução das instalações de média tensão, à freqüência industrial, na faixa coberta pela rede inteligente propriamente dita. Ela incorpora os subsídios básicos de uma instalação de média tensão que opera nos parâmetros atuais que já dispõe de muitos recursos de automação que é fundamental nas redes inteligentes. Além disso, como opera na faixa de consumo A4, o sistema de medição já é compatível com essas redes e já existe a medição remota.

Conforme indicado no item 1.1 da norma o foco da NBR14039 é a garantia de segurança e continuidade do serviço. No entanto a questão da qualidade da energia é mencionada no item 4.2.2 referente à limitação das perturbações. Segundo este item as instalações elétricas não devem prejudicar o funcionamento da rede na qual elas estão ligadas, da mesma forma que os equipamentos que fazem parte dela não devem causar perturbações significativas.

A aplicação desses conceitos exige o estabelecimento de critérios de avaliação da qualidade do produto energia elétrica. Não existem normas técnicas brasileiras (série NBR) sobre a qualidade do produto energia elétrica nas instalações elétricas ou sobre os limites de perturbações que os equipamentos elétricos introduzem nas redes. (2) Entretanto é possível utilizar documentos internacionais como referência, tais como a norma IEC/TR 61000-3-6 ed2.0 – “Eletromagnetic compability” (EMC) – Part 3-6: “Limits” – “Assessment of emission limits for the connection of distorting installationns to MV, HV ande EHV power system”.

Este relatório técnico, que é de natureza informativa, orienta sobre os princípios que podem embasar os requisitos para instalações que provoquem distorções nas redes.

O documento IEC/TR 61000-3-7 ed2.0 – Eletromagnetic compability (EMC) – Part 3-7: Limits – Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installationns to MV, HV ande EHV power system.

Este relatório técnico orienta sobre os princípios que podem embasar os requisitos para instalações que provoquem flutuações nas redes.

Além disso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com seu Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional –PRODIST, módulo 8 sobre qualidade de energia elétrica fornece bases legais para a caracterização da qualidade da energia elétrica.

Os sistemas elétricos e eletrônicos que formam a base da tecnologia das redes inteligentes podem sucumbir aos fenômenos elétricos atmosféricos. A norma NBR 5419 regula as condições mínimas de projeto manutenção e instalação do SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas) desde a parte superior extrema do elemento de captação até o terminal de aterramento principal que é comum ao barramento de equipotencialização principal.

A essência dessa norma é voltada para a proteção das edificações e abrangência para os elementos internos tais como as redes elétricas e de comunicação é tratada através dos pontos em comum nos sistemas, por exemplo, a equipotencialização.

Além disso, o assunto é bastante amplo e abrange até a proteção interna dos equipamentos para constituir um sistema de proteção coordenado e integrado. Desta forma se recomenda a consulta às normas da série IEC61024 e IEC62350 sobre proteção de estrutura e análise de risco, além das normas de equipamentos pertinentes.

A Norma Regulamentadora n° 10 (NR-10) do Ministério do Trabalho e Emprego (MET) faz parte do ordenamento jurídico nacional e tem força de lei. Como ela trata de segurança em instalações e serviços em eletricidade, determina as diretrizes básicas para garantir a segurança dos trabalhadores que direta ou indiretamente lidam com a eletricidade.

Diferente das normas técnicas da série NBR que normalizam os sistemas e procedimentos, mas não possuem o amparo legal, o não cumprimento dessa norma pode resultar em penalidades no rigor da lei. Por outro lado a NR10 muitas vezes faz referência a normas NBR, o que acaba criando um vínculo legal para essas normas.

O conhecimento dessas normas serve como uma base para fundamentar as aplicações de redes inteligentes em muitos de seus aspectos, sendo um trabalho exaustivo pela extensão e profundidade dos temas abordados. Faltam ainda alguns pormenores para que essas normas possam abranger adequadamente as redes inteligentes, posto que há pontos indefinidos acerca delas, mas a evolução combinada pode sanar as dificuldades.

Por outro lado os sistemas de proteção coordenada de uma rede inteligente encontram fundamento nos sistemas de proteção utilizados em subestações e sua automação.

A norma IEC 61850 para automação de subestações contempla suas funcionalidades, requisitos e definições (26).

Existem aplicações disponíveis através de novas ferramentas e IED (Intelligent Electronic Devices) que permitem lidar com a automação de subestações, cuja filosofia pode ser utilizada para orientar a coordenação da proteção em instalações elétricas inteligentes.

Esse sistema funciona através da implementação dos LN (Logical Nodes), mensagens GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) e outras ferramentas para elaborar esquemas lógicos de intertravamentos, transferências de disparos, bloqueios, etc.

Um dos principais objetivos desta norma é garantir a capacidade de operação entre IED de diferentes fabricantes, permitindo o uso e troca irrestrita de dados ao trabalharem em modo cooperativo em um sistema.

“Essa é uma premissa importante para a elaboração de sistemas integrados que não podem ser limitados pelos padrões de um fornecedor, posto que as concessionárias, sendo muito vezes empresas globais exigem integração. O mercado global necessita de uma norma global e de um padrão que suporte todas as filosofias de operação, com uma combinação de dispositivos feita pelo menos da maneira como hoje se faz com cabos de cobre” (26)

O compromisso com a expansão futura já é previsto neste padrão aberto (IEC61850) visando acompanhar os avanços da tecnologia através de extensões de “bays” ou funções. Esta norma estabelece um padrão universal e avançado para comunicação, orientado a sistemas de automação de subestações e seus, aspectos, tais como (26):

- Recomendações para gerenciamento de sistemas e projetos;
- Modelo de dados de domínio específico, incluindo regras para extensão funcional;
- Serviços do sistema de domínio específico;
- Linguagem de configuração da subestação e

- Testes de conformidade.

Para isso ela é estruturada em diversas partes visando cada tópico específico e que permite uma abordagem praticamente completa no que se refere aos sistemas de automação de subestações, o que é uma parte considerável das chamadas redes inteligentes.

Logicamente muitos elementos desse sistema são compatíveis com outras aplicações em sistemas de proteção coordenados permitindo que seu uso possa se disseminar para micro-redes e para as instalações elétricas de baixa tensão, segundo a necessidade.

Mesmo que não se adote padrão tão sofisticado para as aplicações mais modestas, os princípios apontados nesta norma podem orientar o projeto em vários níveis da rede inteligente.

Em resumo, o aspecto de proteção das redes inteligentes abrange desde a proteção intrínseca dos equipamentos nela conectados, os chamados dispositivos inteligentes que podem ser os utensílios dos usuários ou os dispositivos da rede, até os sistemas de proteção coordenada inteligente. Dessa forma se percebe que o alcance é imenso e a quantidade de informações pertinentes e disponíveis também. Isso permite ao projetista uma grande liberdade em função da aplicação, porém exige o conhecimento de uma gama maior de produtos, normas e serviços.

## 3.3. As aplicações residenciais.

As bases para a implantação de um sistema de automação residencial podem ser sedimentadas através da aplicação dos sistemas existentes na indústria. Isso é uma prática comum visto que muitos dos utensílios domésticos atuais foram desenvolvidos inicialmente para auxiliar os processos produtivos.

Daquilo que foi estabelecido anteriormente como o estado da arte da automação é possível identificar elementos aplicáveis às instalações residenciais. A dimensão histórica evolucionária permite divisar como aplicar esses elementos.

De modo geral a automação foi desenvolvida com base em dispositivo eletromecânico denominado relé, auxiliado por interruptores e sensores diversos.

Um relé é um dispositivo composto de um receptor e uma parte executiva que geralmente é um contato elétrico. O receptor ao receber a influência de uma grandeza

física (corrente, tensão, temperatura, intensidade luminosa) aciona a parte executiva, mudando seu estado.

A característica de comando de um relé determina o seu funcionamento, por exemplo, um relé de corrente que é ajustado para determinado nível aciona seu contato (parte executiva) se esse parâmetro supera o valor determinado. Esse parâmetro ajustado é a corrente de operação e um posterior aumento do valor da corrente no receptor do relé não provoca mudança no estado do contato. Por outro lado se o valor da corrente é diminuído para um nível abaixo do parâmetro ajustado o estado do contato é alterado, geralmente voltando à condição inicial.

Os valores de operação de uns relés e os valores de recuperação (para voltar a condição inicial) não são iguais, mais são geralmente muito próximos. A Figura 3.2 ilustra essas características.
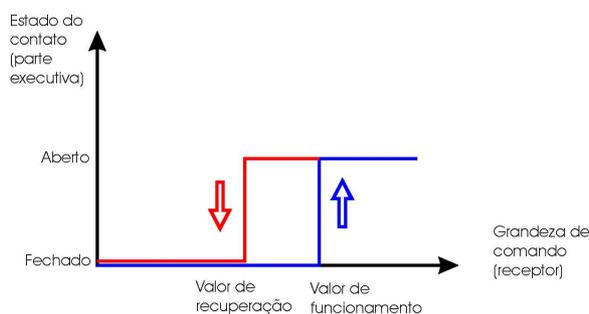
**Figura 3.2 – Característica de comando do relé.**
Fonte: (Autoria própria)

Através da combinação desses dispositivos podem ser desenvolvidos sistemas automáticos para controles em geral. Esses sistemas automáticos constituem os comandos elétricos utilizados para controlar a operação de dispositivos diversos.

Existem diversos exemplos aplicáveis a instalações residenciais, tais como, comandos de bombas hidráulicas em instalações prediais, interruptores crepusculares para acionamento de luminárias durante a noite, comandos de elevadores, etc.

O comando de um circuito de iluminação por múltiplos pontos através de um acionador por pulso, semelhante a um botão de campainha, pode ser implementado pela combinação de um relé simples ($R_1$) e um relé temporizado ($R_T$), conforme ilustra a Figura 3.3.
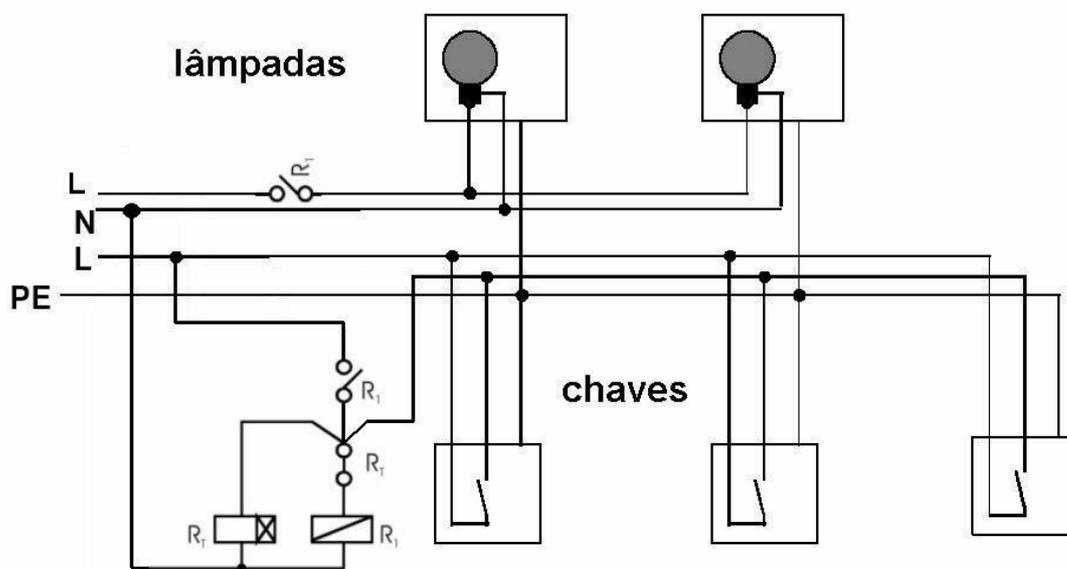
**Figura 3.3 – Comando elétrico para acionamento de lâmpadas a partir de diversos pontos.**
Fonte: (Autoria própria)

Ao ser acionada qualquer uma das chaves a bobina (receptor) do relé $R_1$ é ativada fechando os respectivos contatos. Assim as lâmpadas se acendem e permanece aceso graças à ação de um contato auxiliar de $R_1$, chamado contato de selo. Se qualquer uma das chaves permanecer acionada por um tempo maior do que o ajustado no relé temporizado $R_T$ este atua através de seu contato normalmente fechado, abrindo o circuito da bobina de $R_1$. Com isso as lâmpadas se apagam. Quando liberada a chave o circuito volta à condição inicial.

Esse exemplo de aplicação simples ilustra como um circuito de comando elétrico pode ser utilizado para controlar a iluminação de um andar de um prédio, por exemplo.

A filosofia de elaboração desses circuitos é baseada em blocos simples que são associados para obter o efeito final na automação. As propriedades de funcionamento desses blocos definem a maneira como são interligados.

A propriedade principal do relé $R_1$ é o acionamento de seus contatos (parte executiva) quando sua bobina (receptor) recebe a tensão da rede. O relé temporizado $R_T$ aciona seu contato com um atraso ajustável depois de receber a tensão da rede. As chaves fecham seus contatos quando pressionadas pelos usuários da instalação.

Isso estabelece uma lógica de operação que permite a composição de circuitos elétricos de controle automático a partir da associação de elementos.

A evolução dos comandos elétricos permitiu a criação de circuitos cada vez mais complexos e o início da era da computação eletrônica de dados ocorreu em computadores que continham relés como elementos operacionais.

O desenvolvimento e difusão da eletrônica permitiram a criação de relés mais sofisticados que agregaram mais funções. Algumas funções de contatos em relés passaram de dispositivos eletromecânicos para similares em estado sólido.

Paralelamente a isso, os computadores que continham elementos eletromecânicos evoluíram para dispositivos eletrônicos digitais com capacidade de emular através da lógica a operação de sistemas complexos. Esses computadores foram diminuindo em tamanho e aumentando em complexidade permitindo que o sistema computacional pudesse ser montado praticamente em um circuito integrado.

Exemplo desse tipo de integração é o componente denominado micro-controlador que agrega todas as funções básicas de um computador, tais como os meios de entrada e saída de dados, controlador lógico programável, memórias voláteis e permanentes e instruções do sistema operacional básico.

Associando esses dispositivos aos relés é possível obter um Controlador Lógico Programável (CLP), cuja operação se baseia no conjunto de instruções armazenadas na memória.

O CLP tem a capacidade de emular o comportamento de vários relés associados de modo a criar o efeito de um circuito de comando elétrico completo. Isso é feito através da associação de blocos lógicos que simulam o comportamento dos vários relés.

A forma de programar esses elementos evoluiu junto com as linguagens de programação. Existe desde CLP programável através de linguagem literal e aquele programável por meio de diagrama de blocos, alguns modelos são programados através de uma conexão com um computador e outros por meio de um painel próprio.

Um circuito equivalente ao da Figura 3.3 utilizando um CLP pode ser visto na Figura 3.4.
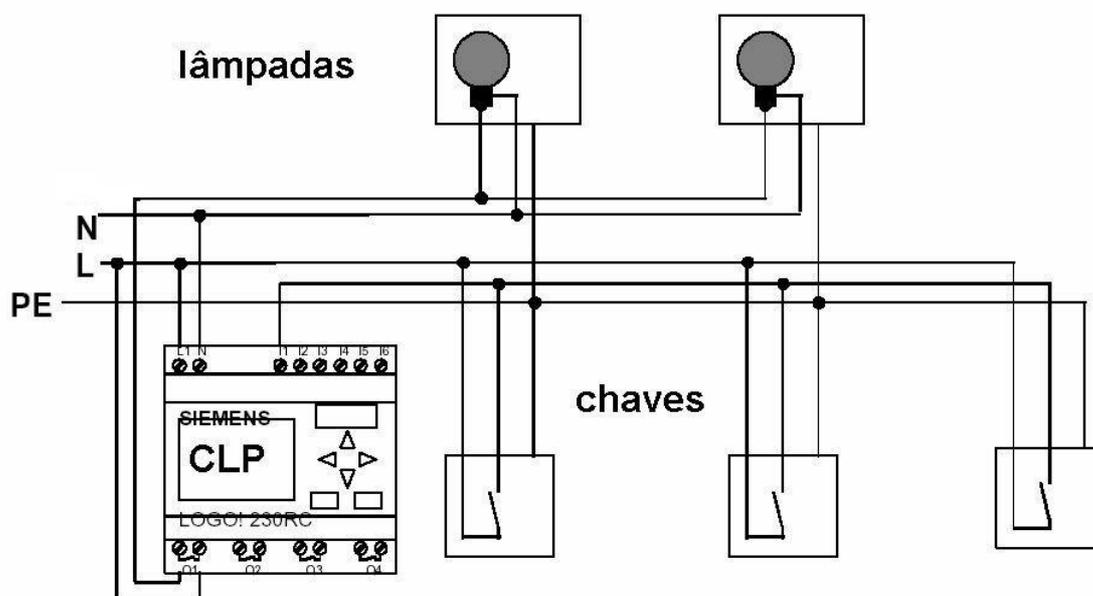
**Figura 3.4 – Comando com CLP para acionamento de lâmpadas a partir de diversos pontos.**
Fonte: (Autoria própria)

O funcionamento do circuito é similar ao anterior, porém neste caso um pulso liga as lâmpadas e outro pulso apaga. O comando inserido no CLP através de seu painel frontal é composto pelo símbolo designado para acionador por pulso, conforme ilustra a Figura 3.5.
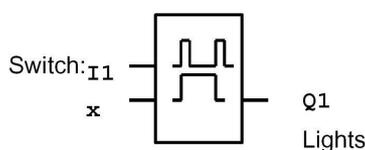
**Figura 3.4 – Instrução para operação do CLP.**
Fonte: (Autoria própria)

A linguagem gráfica permite a programação do CLP através de esquemas simples que podem ser reconhecidos facilmente por profissionais da área elétrica, dispensando o aprendizado de uma linguagem específica de programação.

A vantagem desta configuração é a flexibilidade proporcionada pelo CLP que pode incorporar acionamento temporizado somente com a alteração de sua programação.

O modo de execução de uma instalação elétrica pode ser afetado com o emprego desses equipamentos. O exemplo permite distinguir uma linha de comando que pode ser constituída por condutores de seção muito reduzida, pois a corrente é muito baixa. A linha de potência alimenta diretamente as cargas, tendo passado previamente pelo CLP que a controla.

Dessa forma o circuito elétrico pode ser padronizado e simplificado pela ausência dos condutores de retorno nos interruptores, porém haveria uma linha adicional para os sinais de comando.

Por outro lado a linha de comando admite grande variação de soluções possíveis que pode ser o comando sem fio por ondas de rádio ou o uso dos cabos de uma rede de informática.

Nesse particular, devido à difusão das redes de computadores nas instalações domésticas, por causa da Internet, a inclusão de uma linha de dados é uma alternativa cada vez mais acessível.

Desse modo a montagem física de uma instalação residencial pode se dividir em um circuito de força e um de comando de modo similar a um comando elétrico de uma instalação industrial. Isso aumenta a flexibilidade para o acionamento dos componentes da instalação na medida que o sistema (ou circuito) de comando possa ser configurado de diversos modos.

Conclui-se, portanto que a automação das instalações elétricas, em particular as residenciais permite que ela possa se adaptar mais facilmente às mudanças. Essa característica é particularmente importante dentro de uma rede inteligente de distribuição de energia.

# 4. AVALIAÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA.

O propósito do uso da energia é satisfazer as necessidades humanas. Para isso pode ser utilizada diretamente para prover aquecimento, iluminação, cocção e transporte, ou indiretamente para produzir bens ou serviços.

Dentre as formas de energia disponíveis a elétrica é a mais versátil devido à variedade de tecnologias de manejo disponível. Essas tecnologias convertem a energia elétrica em outras formas de energia útil a uma razão denominada potência elétrica.

A potência elétrica é a razão da energia convertida sobre o tempo de conversão e representa a velocidade em que um trabalho é realizado.

A quantidade de energia utilizada para realizar um trabalho é base para o cálculo da remuneração dos fornecedores de energia. O preço ou custo da energia é então um meio pelo qual os consumidores se relacionam aos fornecedores e a medição justa é importante para manter uma relação equilibrada entre eles.

A avaliação justa e precisa da energia depende dos limites tecnológicos existentes e à medida que eles são superados se admite que mudanças ocorram para incorporar os avanços da técnica.

Nem sempre é possível se incorporar o que há de melhor em termos de medição aos sistemas elétricos devido aos custos elevados, entretanto, devido ao barateamento de dispositivos de medição mais apurados essa barreira vai sendo eliminada.

Não havendo impedimentos econômicos para a adoção de medidores mais sofisticados é meritório se rever os conceitos teóricos relacionados à avaliação de potência com vistas a adota-los nas aplicações de rotina.

A verificação, análises e ajustes dos circuitos elétricos e eletrônicos levaram a necessidade de se executar medidas das grandezas que intervêm nos mesmos, a fim de ajustar ou substituir os vários componentes do circuito e assim permitir o seu correto funcionamento.

Essas grandezas que intervêm nos circuitos dependem de indicações de aparelhos elétricos de medição, pois os órgãos dos sentidos do homem não permitem avaliar diretamente as magnitudes elétricas.

Dessa forma foram desenvolvidos instrumentos que convertem a ação elétrica em uma variação física sensível, tal como o deslocamento de um ponteiro, o girar de um disco, o acender de uma luz, etc.

Tais instrumentos foram desenvolvidos passando por etapas evolutivas desde os primeiros analógicos até os mais sofisticados entre os digitais e no processo definem o limite mensurável pelas limitações impostas pela tecnologia. Por exemplo, um instrumento de bobina móvel projetado basicamente para indicar o valor médio de uma corrente seria inútil ao medir corrente alternada se não fosse o retificador. Por outro lado, a escala deve ser adaptada dependendo da configuração desse retificador e da forma de onda medida.

O alcance das medidas depende da tecnologia empregada no instrumento, por exemplo, o instrumento de ferro móvel possui a característica intrínseca de medir o valor eficaz de um sinal alternado, sem a necessidade do retificador.

Grande é a importância do estudo das particularidades dos instrumentos, pois dele depende a confiança nos resultados. Além disso, como a energia elétrica representa um custo social, também é conveniente estudar como esses conceitos se associa a remuneração do capital.

Considerando que muitas vezes o medidor utiliza micro-controlador, ou outro dispositivo programável, é importante rever a teoria básica, com a finalidade de elaborar os algoritmos que fazem com que esses instrumentos virtuais operem.

A ordem de abordagem dos tópicos reflete, grosso modo, uma seqüência evolutiva em função das necessidades técnicas por medidas mais precisas. Começando pela potência da tensão e corrente elétrica constante até a correção do fator de potência de cargas não lineares, seguindo uma ordem operacional.

As aplicações mais simples desses princípios podem envolver medições com baterias e painéis solares até as mais complexas nas redes afetadas por componentes harmônicas.

Mesmo as aplicações simples com dispositivos eletrônicos em circuitos de tensão contínua também estão sujeitas a influência de correntes pulsantes, o que justifica uma revisão dos conceitos, sem perder de vista uma possível aplicação nos chamados instrumentos virtuais e nos micro-controladores. Esses dispositivos dependem da lógica integrada através dos programas para operarem, e dessa forma os elementos virtuais operam de modo similar aos mecanismos encontrados nos instrumentos reais.

**4.1 A potência da tensão e corrente elétrica constante.**

Para caracterizar as condições energéticas é importante determinar a rapidez com que se executa um trabalho, ou seja, a velocidade em que a energia é convertida de uma forma para outra (28). O trabalho realizado por unidade de tempo é denominado potência:

$$P = \frac{dW}{dt} \qquad (3.1)$$

Nos circuitos elétricos alimentados por corrente contínua em regime contínuo de operação se encontra a forma mais simples de se caracterizar a potência da corrente elétrica. Neste caso se adapta a expressão anterior para:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} \qquad (3.2)$$

Se o movimento de cargas produz uma corrente de intensidade constante, resulta que:

$$\Delta Q = I * \Delta t \qquad (3.3)$$

A outra grandeza fundamental que caracteriza uma instalação elétrica é a tensão. Sendo esta numericamente igual ao trabalho realizado ao se deslocar uma unidade de carga entre dois pontos, ou seja:

$$U = \frac{\Delta W}{\Delta Q} \qquad (3.4)$$

Combinando as duas expressões anteriores (3.3 e 3.4):

$$\Delta W = U * I * \Delta t \qquad (3.5)$$

E substituindo na expressão da potência (3.2):

$$P = \frac{U * I * \Delta t}{\Delta t} = U * I \qquad (3.6)$$

A unidade de potência é o Watt (símbolo W) ou VA = J/s, que se pode deduzir das dimensões das variáveis utilizadas nas expressões acima (análise dimensional).

O aparelho que mede a potência é o wattímetro que tem dois circuitos de medição, um deles é o circuito de corrente que se liga como o amperímetro, ou seja, em série com a carga. O outro é o de tensão que se liga como o voltímetro, ou seja, em paralelo com a carga. O medidor de potência, será analisado em maiores detalhes no próximo capítulo.

Mesmo os instrumentos de medição eletrônicos e micro-controladores mais simples não têm dificuldade para medir o valor da tensão e da corrente contínua com boa precisão, o que é uma vantagem econômica para sua difusão pela rede elétrica. Além disso, o valor carga da e da energia obtidos pelas expressões 3.3 e 3.5 podem ser utilizados no gerenciamento de sistemas de acumulação. O sistema operado com tensão e corrente constante pode operar com um sistema de medição baseado nessas premissas simples.

Por outro lado, a rede elétrica atual opera predominantemente com corrente alternada e por isso as definições utilizadas para corrente contínua devem ser complementadas para estabelecer um modelo abrangente que caracterize adequadamente a forma de programar o núcleo dos instrumentos.

## 4.2. A potência em corrente alternada.

### 4.2.1. A potência instantânea e a potência ativa em circuitos com tensão e corrente senoidais.

A potência instantânea da corrente alternada é igual ao produto dos valores instantâneos da intensidade da corrente e da tensão nos terminais do circuito, pelo qual passa a corrente. Essa expressão da potência é similar ao caso da corrente contínua, mas as variações periódicas da tensão e corrente alternadas provocam variações periódicas da potência que elas desenvolvem. Esta potência instantânea não é uma grandeza prática para avaliar o consumo de energia das instalações que funcionam com base na corrente alternada. Por isso a grandeza básica empregada para avaliar o consumo de energia nos dispositivos de corrente alterna é a sua potência média durante um período, denominada potência ativa, medida com wattímetros de corrente alternada (28).

No caso mais simples de uma carga linear alimentada por uma tensão senoidal, a relação entre potência ativa e os valores eficazes da tensão e da intensidade da corrente pode ser determinada através das equações de potência instantânea.

A dedução das expressões matemáticas até a definição de um valor correspondente à potência ativa possibilita compreender sua aplicação nos instrumentos de medição eletrônica. Além disso, mostra como esses princípios orientaram a elaboração dos mecanismos dos medidores eletromecânicos.

Num certo circuito arbitrário a potência instantânea é criada pela tensão e pela corrente, com forma de onda senoidal e defasagem entre elas, sendo expressa matematicamente pelo produto das duas.

$$u(t) = U_{máx} * sen(wt)$$
$$i(t) = I_{máx} * sen(wt - j)$$
$$p = U_{máx} * sen(wt) * I_{máx} * sen(wt - j) \qquad (4.7 \text{ a } 4.9)$$

$$p = U_{máx} * I_{máx} * (sen^2 wt * \cos j - sen j * sen wt * \cos wt) \qquad (4.10)$$

Como se sabe a partir da trigonometria,

$$sen^2 wt = \frac{1 - \cos 2wt}{2} \quad \text{e} \quad sen wt * \cos wt = \frac{sen 2wt}{2} \qquad (4.11 \text{ e } 4.12)$$

Daí se deduz que

$$p = \frac{U_{máx} * I_{máx}}{2} * (\cos j - \cos j * \cos 2wt - sen j * sen 2wt)$$
$$p = \frac{U_{máx} * I_{máx}}{2} * [\cos j - (\cos j * \cos 2wt + sen j * sen 2wt)] \qquad (4.13 \text{ e } 4.14)$$

Ainda a partir da trigonometria:

$$\cos(2wt - j) = (\cos j * \cos 2wt + sen j * sen 2wt) \qquad (4.15)$$

$$p = \frac{U_{máx} * I_{máx}}{2} * [\cos j - \cos(2wt - j)] \qquad (4.16)$$

A potência instantânea é composta por um termo constante, que é independente do tempo e um termo variável em função do tempo. O primeiro termo, constante ao longo do tempo é representado por uma reta. O segundo termo é representado por uma função co-seno com o dobro da freqüência dos sinais de tensão e da corrente.

Graficamente essa expressão corresponde à curva da potência instantânea ilustrada a seguir.
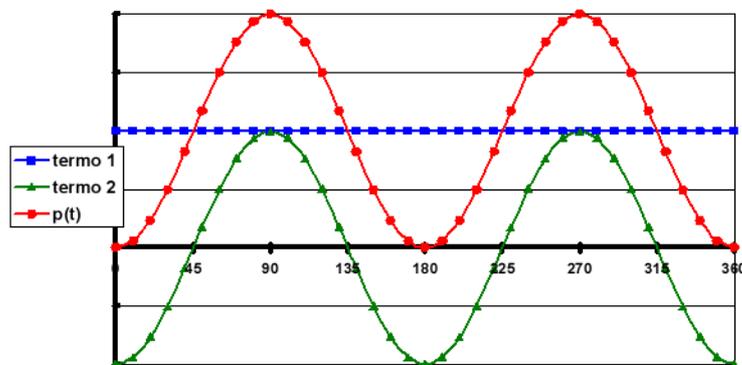
**Figura 4.1 – Decomposição da forma de onda da potência alternada.**
Fonte: (MUSSOI, 2006).

Dessa curva podemos extrair graficamente alguma informação acerca da potência. A potência ativa corresponde à distância do ponto médio (termo 1, em azul) entre os picos negativos e positivos da potência instantânea (*p(t)*, em vermelho), relativa ao eixo do tempo.

A potência aparente corresponde ao valor de pico da potência instantânea p(t), deslocada da distância ao ponto médio de forma a tornar a onda simétrica em relação ao eixo do tempo (termo2, em verde). Matematicamente isso é compreensível através das expressões 4.17 a 4.19 e dedução a seguir.

Havendo um circuito eletrônico que produza em sua saída um sinal correspondente ao produto de dois sinais de entrada, conforme se observa no capítulo 5, é possível empregar medidores digitais para obter o valor da potência.

Um voltímetro digital com circuito configurado para obter o valor médio pode indicar o valor da potência ativa. Um outro voltímetro configurado para obter o valor de pico da componente alternada desse sinal pode indicar a potência aparente. Isso pode ser implementado com arranjos simples de circuito.

O mesmo pode ser emulado em um micro-controlador que opere um circuito de aquisição de dados. Neste caso, se obtém praticamente os valores instantâneos de corrente e tensão para calcular o produto e o valor médio e de pico, tudo através de um programa adequado.

A implementação desse programa, no entanto, parte da premissa de que se está lidando com sinais na forma senoidal, como hipótese simplificadora, o que constitui uma limitação para a capacidade de tal medidor.

No caso da potência ativa em princípio não há problemas com o valor indicado, pois o valor medido está vinculado a definição da potência. No caso da potência aparente o uso

do valor de pico da componente alternada da onda correspondente ao produto só é válido no caso senoidal e por isso um instrumento cujo algoritmo seja baseado nessa premissa estará sujeito ao erro.

Conforme indicado anteriormente, para efeito prático, durante os cálculos envolvendo potência nos circuitos elétricos, utilizamos o valor médio e não o instantâneo. A partir dessa premissa podemos simplificar a expressão da potência instantânea para calcular o valor médio da potência.

Sabemos ainda que ao calcular o valor da potência média a partir da instantânea, durante um período da alternância, notamos que o valor médio correspondente aos componentes variantes com o tempo é igual a zero, pois essas funções são simétricas com relação à área nos semiciclos positivo e negativo. Já o termo da expressão que não inclui a função do tempo é, portanto a potência média da corrente alternada, denominada potência ativa sendo igual a:

$$P = \frac{U_{máx} * I_{máx} * \cos j}{2} \qquad (4.17)$$

Como:

$$U_{máx} = U * \sqrt{2} \text{ e } I_{máx} = I * \sqrt{2} \qquad (4.18)$$

Substituindo estas expressões na fórmula anterior, obtemos a fórmula para potência ativa da corrente alternada senoidal.

$$P = U * I * \cos j \qquad (4.19)$$

Essa expressão é correta independente da causa da defasagem ser um indutor ou um capacitor. Na expressão da potência o valor do co-seno do ângulo representa o fator de potência do circuito, pois como é possível deduzir da expressão anterior ele corresponde à razão entre a potência ativa ***P*** e a potência aparente ***U*I***.

Além da potência ativa existem outras duas grandezas auxiliares relacionadas que servem para caracterizar a taxa de transferência de energia no tempo. Uma delas é a potência aparente e a outra a potência reativa. Para cálculos envolvendo corrente alternada senoidal de freqüência única elas se relacionam através do triângulo de potências, conforme a seguir.

### 4.2.2. A potência ativa, reativa e aparente da corrente alternada senoidal.

“Ao selecionar os transformadores, seções de cabos, interruptores, etc., é necessário saber qual a intensidade da corrente que esses componentes suportam. Para isso não é suficiente conhecer a tensão e a potência ativa P, mas há que se determinar o fator de potência, no caso senoidal o $\cos j$ da instalação. Quando há vários receptores de energia com diferentes fatores de potência, esses cálculos se complicam substancialmente. Para facilitar esses cálculos se introduzem duas grandezas auxiliares: a potência aparente $S = U * I$ e a potência reativa $Q = S * I * sen j = X * I^2$ ”. (28)

Sobre a potência aparente se pode dizer que sua expressão é similar a da potência com corrente e tensão constante. Entretanto a potência aparente não exprime a taxa de conversão da energia no tempo do mesmo modo que nos circuitos com tensão e corrente constante e por isso se introduz o conceito de fator de potência como a relação entre a potência que efetivamente produz trabalho e o valor que é calculado pelo produto da tensão pela corrente.

A relação entre potência ativa, reativa e aparente se observa através do triângulo de potências, conforme indicado na Figura 4.2. Para construir esse triângulo se pode tomar o triângulo de tensões e multiplicar pelas respectivas correntes. Sua hipotenusa representará a potência aparente $S$ e os catetos a potência ativa $P$ e a reativa $Q$. As relações matemáticas entre elas são:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}\,; P = S * \cos j\,; Q = S * sen j\,; Q = P * \tan j \qquad (4.20)$$
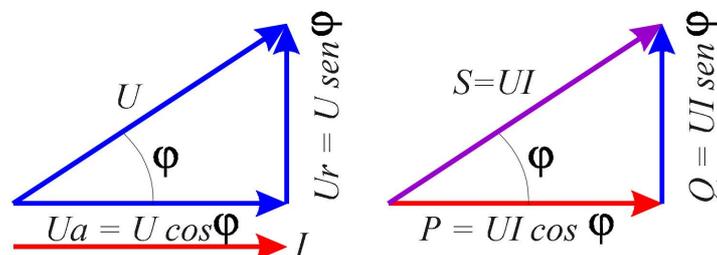
**Figura 4.2 – Triângulo de potências.**
Fonte: (KASSATKIN, 1980).

Geralmente a característica nominal do transformador ou gerador é dado pela potência aparente. Isso se deve ao fato de que o isolamento é definido pela tensão nominal e a seção dos condutores é calculada em função de uma corrente de condução nominal. Portanto, se limitam individualmente pela tensão e corrente e, além disso, essas limitações não dependem do fator de potência. Deste modo o produto dos valores eficaz nominal da tensão e corrente determina a potência aparente nominal do equipamento, sendo por isso similar à aplicada em circuitos com tensão e corrente contínua. Como se demonstrou anteriormente à potência ativa se relaciona com a potência aparente determinando o fator de potência neste caso a relação é:

$$\cos j = \frac{P}{S} \qquad (4.21)$$

Isso significa que quanto menor o valor da potência ativa em relação à potência aparente (que é fixa pelas características nominais de tensão e corrente) menor o aproveitamento do potencial da máquina na proporção dada pelo ângulo de defasagem.

Para corrigir o problema e melhorar o aproveitamento do potencial das máquinas se efetua a correção do fator de potência, utilizando o conceito de potência reativa Q. Embora não haja conversão da energia elétrica em outras formas de energia no caso da potência reativa, pois ela somente é armazenada e restituída ao sistema no processo, considera-se para efeito de modelo que haja um consumo desta.

Por isso se considera que diversos receptores de energia elétrica consomem tanto a potência ativa P como a reativa Q. A potência aparente que determina, por exemplo, a capacidade do transformador de alimentação se calcula através da seguinte expressão:

$$S = \sqrt{\sum P^2 + \sum Q^2} \qquad (4.22)$$

A potência reativa se mede em volt-ampéres reativos (VAr) e representa a soma de toda carga reativa.

Tendo um instrumento capaz de medir a potência ativa e a aparente, conforme discutido anteriormente é possível calcular a potência reativa e por conseqüência a energia reativa, que é usada para o cálculo do fator de potência, segundo critérios legais. Entretanto os valores obtidos das expressões anteriores estão sujeitas àquelas restrições.

De modo diverso da potência ativa existe dois tipos de potência reativa conforme a natureza do elemento que a originou. A potência ativa capacitiva é considerada convencionalmente negativa e os capacitores, portanto são considerados como geradores de potência reativa $Q_C$ e os indutores como receptores $Q_L$, pois sua potência é

considerada positiva. Se entre os receptores há capacitores e indutores a expressão da potência aparente se torna:

$$S = \sqrt{\sum P^2 + \left(\sum Q_L - \sum Q_C\right)^2} \qquad (4.23)$$

Com isso é possível corrigir o fator de potência através do equilíbrio entre as cargas capacitivas e indutivas. Normalmente nas instalações elétricas as cargas tendem a ser indutivas e por isso se utilizam capacitores para a correção do fator de potência.

Atualmente com o aumento da contribuição dos equipamentos eletrônicos que produzem deformações nas formas de onda, o procedimento para a correção de fator de potência hoje é diferente do enunciado anteriormente. A deformação se manifesta basicamente na onda de corrente, gerando harmônicas em várias freqüências. Desde que não haja distorção na onda de tensão, somente a onda de corrente fundamental produz potência ativa, de modo que o fator de potência diminui, pois a potência aparente ainda aumenta com as harmônicas. Desta forma a correção do fator de potência depende da filtragem da harmônica indesejada.

Para estabelecer um procedimento para a correção do fator de potência nesses casos é importante desenvolver melhor a definição de valor eficaz já que ele se relaciona a potência ativa através da potência aparente.

### 4.2.3. O valor eficaz da tensão e corrente.

A amplitude fundamental para caracterizar a corrente ou tensão alternada é seu valor eficaz. Isso se deve ao fato de que a tensão e a corrente assumem valores que variam com o passar do tempo e para efeitos práticos é necessário indicar o melhor valor para representa-los. No caso de tensão ou corrente contínua flutuante se assume que o valor médio melhor representa seu comportamento.

Aplicando o mesmo princípio em um sinal alternado simétrico, como o senoidal, o valor obtido é nulo, o que indica que o valor médio não representa o comportamento da corrente alternada.

No caso da corrente alternada isso pode ser feito pelo valor da média quadrática ou valor eficaz, que corresponde à raiz quadrada do valor médio dos n valores instantâneos medidos em intervalos regulares, elevados ao quadrado.

$$I_{eficaz} = \sqrt{(i^2)_{médio}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} i_i^2}{n}} \qquad (4.24)$$

Essa forma de quantificar a corrente elétrica é interessante se consideramos que os seus efeitos em uma série de aplicações são proporcionais ao quadrado. Por exemplo, o efeito térmico, a interação mecânica dos condutores de ida e retorno, etc. Existe ainda um parâmetro muito utilizado para quantificar a proteção contra curto-circuito que se baseia no produto do valor eficaz da corrente ao quadrado pelo tempo de condução, conhecida como integral de Joule.

Ao se determinar o valor eficaz da corrente alternada comparando o efeito térmico da corrente contínua de igual valor, a condição fundamental é que a potência dissipada seja a mesma nos dois casos. A aplicação desse princípio é possível em instrumentos que operam termicamente, por deslocamento de um elemento bi-metálico, por exemplo.

Um bom exemplo para esclarecer a forma de aplicação deste princípio é a dedução do valor eficaz de uma onda senoidal de corrente.

A potência dissipada em uma resistência pode ser expressa como a relação:

$$P = R * i^2 \qquad (4.25)$$

Para a corrente senoidal

$$i = I_{máx} * senwt \qquad (4.26)$$

Cujo valor elevado ao quadrado é

$$i = I_{máx}^2 * (senwt)^2 \qquad (4.27)$$

E como

$$(senwt)^2 = \frac{1 - \cos 2wt}{2} \qquad (4.28)$$

Então:

$$i^2 = I_{máx}^2 * \frac{1 - \cos 2wt}{2} = \frac{I_{máx}^2}{2} - \frac{I_{máx}^2}{2} \cos 2wt \qquad (4.29)$$

Para calcular o valor eficaz se utiliza o valor médio por período utilizado deste valor instantâneo. Dessa forma o segundo termo que envolve uma onda senoidal simétrica é zero de modo que o valor da média quadrática é:

$$(i^2)_{médio} = \frac{I_{máx}^2}{2} \quad (4.30)$$

O valor eficaz corresponde à raiz quadrada deste valor conforme a definição de modo que:

$$I_{eficaz} = \sqrt{(i^2)_{médio}} = \sqrt{\frac{I_{máx}^2}{2}} = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}} \quad (4.31)$$

Esse princípio pode ser estendido para qualquer forma de onda, de modo que partindo da condição em que se sabe o valor da potência ativa e da resistência, se pode determinar o valor eficaz real da corrente elétrica. Em outras palavras se mede a potência ativa na resistência de derivação (shunt) de um circuito de medição de corrente.

Através da aplicação deste princípio também é possível deduzir a expressão geral do valor eficaz da corrente.

$$I_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T i^2 dt} \quad (4.32)$$

A variável T corresponde ao período da corrente alternada e a integral reafirma o cálculo do valor médio por período.

Essa expressão é válida para caracterizar qualquer forma de onda. Para uso nos equipamentos de medição digitais a expressão pode ser simplificada. Um exemplo disso é observado no algoritmo de equipamentos digitais de medição do fabricante Yokogawa, cuja fórmula se encontra a seguir:

$$I_{eficaz} = \sqrt{\frac{\sum_{i=m}^{n} D(i)^2}{n-m+1}} \quad (4.33)$$

Onde D(i) são os valores digitalizados no período compreendido entre as aquisições m e n na base de tempo do digitalizador que os identifica pelo índice i. Dessa forma se efetua o cálculo numérico da integral na base de um valor médio de (n-m) pontos amostrados. Por outro lado isso pode levar a erros de resolução consideráveis se a taxa de amostragem é baixa, ou seja, se o número de pontos amostrados for insuficiente.

Utilizando a mesma definição do valor eficaz é possível calcular o valor da corrente e da tensão e com o produto deles determinar a potência aparente.

O valor da potência aparente é afetado pelas deformações harmônicas na corrente e tende a subir com o aumento destas. Desta forma o fator de potência tende a cair com as deformações harmônicas, pois se considera que o trabalho útil representado pela potência ativa seja praticamente fixo.

### 4.2.4. A potência instantânea e a ativa em circuitos com tensão senoidal e corrente não senoidal.

Sabendo como se determina o valor eficaz da corrente e da tensão podemos determinar o valor da potência aparente. O outro valor utilizado no cálculo do fator de potência é a potência ativa, cujo valor já foi indicado para o caso senoidal de freqüência única.
"Para manter a forma senoidal das curvas das correntes e tensões alternadas e impedir o seu afastamento da forma senoidal nos sistemas elétricos se tomam várias medidas. Porém diversos dispositivos tais como transformadores operando em vazio, circuitos eletrônicos e outros aparelhos esses desvios da forma harmônica são criados pelo seu processo básico de funcionamento" (28). Geralmente esses dispositivos afetam a forma de onda da corrente muito mais do que a da tensão. Por isso é possível considerar para a avaliação da potência a condição de tensão senoidal de freqüência única, fundamental correspondente a da rede (no Brasil, 60Hz) e corrente não senoidal representada através das várias componentes harmônicas senoidais.
As variações não senoidais são periódicas se todo o processo se repete após um intervalo de tempo determinado, chamado de período.
Essa variação periódica de intensidade da corrente pode ser representada, sob a forma matemática, como a soma das senóides de diversas freqüências e de diversas fases iniciais. Esta forma matemática se denomina série de Fourier. Para a corrente não senoidal esta série tem a seguinte forma:

$$i(t) = I_0 + I_{1m} * sen(wt + y_1) + I_{2m} * sen(2wt + y_2) + I_{3m} * sen(3wt + y_3) + \ldots I_{nm} * sen(nwt + y_n) \qquad (4.34)$$

sendo $I_0$ uma componente constante (corrente contínua); $I_{1m} * sen(wt + y_1)$ a onda fundamental, isto é a oscilação senoidal, cuja freqüência é igual a da onda não senoidal e todas as outras componentes são harmônicas superiores de ordem 2, 3,...n.

Logo, a corrente não senoidal pode ser considerada como a soma da corrente contínua e das correntes alternas senoidais de diversas freqüências e diversos ângulos de fase iniciais.

No circuito linear, cujos parâmetros não dependem da intensidade da corrente, podem se calcular as correntes separadamente para cada componente harmônica (princípio da sobreposição). Para qualquer destas componentes é correta a lei de Ohm formulada para a corrente senoidal.

Essa forma de análise é representada graficamente por uma série de amplitudes que variam conforme múltiplos inteiros da freqüência fundamental, ou seja, é uma análise no domínio da freqüência.

A potência média ou ativa P depende da integração da potência instantânea obtida pelo produto dos valores instantâneos da tensão e da corrente (32).

No caso geral o produto seria das diversas tensões e correntes nas diversas freqüências cujo conjunto representa as ondas não senoidais analisadas, assim:

$$p = v * i = [V_0 + \sum V_{nm} * sen(nwt + f_n)] * [I_0 + \sum I_{nm} * sen(nwt + y_n)] \qquad (4.35)$$

Como v e i têm períodos de T segundos, seu produto deve conter um número inteiro de períodos, considerando que para essas ondas senoidais o produto tem um período igual à metade das senoides que o geraram. A potência média é igual a:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T [V_0 + \sum V_{nm} * sen(nwt + f_n)] * [I_0 + \sum I_{nm} * sen(nwt + y_n)]dt \qquad (4.36)$$

“O exame dos termos possíveis no produto das duas séries infinitas mostra que eles são dos seguintes tipos: o produto de duas constantes, o produto de uma constante por uma função senoidal, o produto de duas funções senoidais com freqüência diferentes e o quadrado de funções senoidais. Após a integração, o produto das duas constantes $V_0I_0$ permanece e as funções senoidais ao quadrado, aplicado aos limites de integração, aparecem como” (32):

$$\frac{V_{nm} * I_{nm}}{2} * \cos(fn - yn) = \frac{V_{nm} * I_{nm}}{2} * \cos j_n \qquad (4.37)$$

Todos os outros produtos, integrados no período T, são nulos. A potência média é então:

$$P = V_0 * I_0 + \frac{1}{2} V_{1m} * I_{1m} \cos j_1 + \frac{1}{2} V_{2m} * I_{2m} \cos j_2 + \frac{1}{2} V_{3m} * I_{3m} \cos j_3 + \ldots \qquad (4.38)$$

Onde $\varphi_n$ é o ângulo da impedância equivalente do circuito na velocidade angular $n\omega$ em radianos por segundo e $V_{nm}$ e $I_{nm}$ são os valores máximos das respectivas funções senoidais de tensão e corrente. Observa-se também que tensão e corrente de freqüências diferentes não contribuem para a potência média, de modo que cada harmônico atua de modo independente na composição da potência ativa.

Considerando que a forma de onda de tensão da rede normalmente não é afetada pela carga não linear, somente existe a fundamental $V_{1m}$ e por isso todos os valores da componente contínua $V_0$ e as harmônicas superiores $V_{(n+1)m}$ são nulos. A partir dessa premissa a expressão da potência ativa pode ser simplificada para:

$$P = \frac{1}{2} V_{1m} * I_{1m} \cos j_1 \qquad (4.39)$$

Os valores eficazes da tensão e corrente senoidal se relacionam com os valores máximos através das seguintes expressões:

$$V_1 = \frac{V_{1m}}{\sqrt{2}} \quad \text{e} \quad I_1 = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} \qquad (4.40 \text{ e } 4.41)$$

Substituindo então, teremos:

$$P = \frac{1}{2} V_{1m} * I_{1m} \cos j_1 = \frac{V_{1m}}{\sqrt{2}} * \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} * \cos j_1 = V_1 * I_1 * \cos j_1 \qquad (4.42)$$

Conhecendo os componentes fundamentais da tensão e da corrente e o ângulo de defasagem entre as respectivas ondas é possível calcular a potência ativa mesmo em circuitos com cargas não lineares alimentadas por fonte senoidal de tensão.

Essa propriedade pode ser aproveitada na análise de circuitos elétricos que contenham cargas não lineares e determinar a influência desses elementos sobre o fator de potência, desde que não ocorra deformação significativa na tensão da rede.

### 4.3. A aplicação prática dos conceitos na avaliação da demanda e do fator de potência.

A teoria que fundamenta as medições elétricas em corrente alternada envolve muitos parâmetros que descrevem em detalhes os fenômenos elétricos.

Entretanto, para aplicações práticas (se inclui o custo social da energia) é importante se resumir às descrições a alguns parâmetros mais significativos e assim facilitar o controle para os operadores do sistema.

Dessa forma se sobressaíram valores específicos que melhor representam os efeitos da corrente elétrica tais como o valor médio, o valor eficaz, o valor de pico, tanto para tensão como para a corrente, a potência ativa, que é definida como um valor médio e as grandezas auxiliares relacionadas como a potência aparente, a reativa e o fator de potência.

Os conceitos de potência aparente, ativa e reativa, valor eficaz da tensão corrente e, por conseguinte o fator de potência foi inicialmente desenvolvido para sistemas elétricos que operam cargas lineares, alimentados por tensões na forma de onda senoidal, operando em regime estável. A técnica utilizada para análise e operação desses sistemas está bem sedimentada entre os técnicos e engenheiros que atuam na área elétrica.

A disseminação de cargas não lineares, na forma de equipamentos eletrônicos, impôs a esses profissionais problemas de interpretação para os quais, algumas vezes não se encontram devidamente preparados (30).

A presença de cargas não lineares nas instalações elétricas pode ser percebida pelo consumidor residencial através da aplicação de multas decorrentes do baixo fator de potência, apurado pelos medidores de energia eletrônicos. Dessa forma a influência das cargas não lineares sobre o fator de potência adquire uma importância revitalizada devido ao interesse despertado na sociedade.

O baixo fator de potência que se observa devido à presença de cargas não lineares é diferente daquele produzido por reatores e capacitores e por isso o método de correção deve levar em conta as particularidades desses elementos do circuito.

Independente da natureza do baixo fator de potência é possível propor dois circuitos simples, um contendo uma carga não linear e outro uma carga linear, que apresentam características similares para comparação.

Através da aplicação das expressões utilizadas nos cálculos de circuitos elétricos com retificador de meia onda se observa a diferença de tratamento para uma carga linear e para uma carga não linear e porque as formas de correção do fator de potência devem respeitar essa diferença. Além disso, esses circuitos simples podem ser utilizados para verificar o funcionamento dos medidores.

Os circuitos são constituídos de um gerador e dois dipolos, cada dipolo é composto de dois elementos, sendo um deles uma resistência que é comum aos dois circuitos e o

outro é um indutor no caso do circuito linear ou um diodo no circuito não linear, conforme ilustra a Figura 4.3.
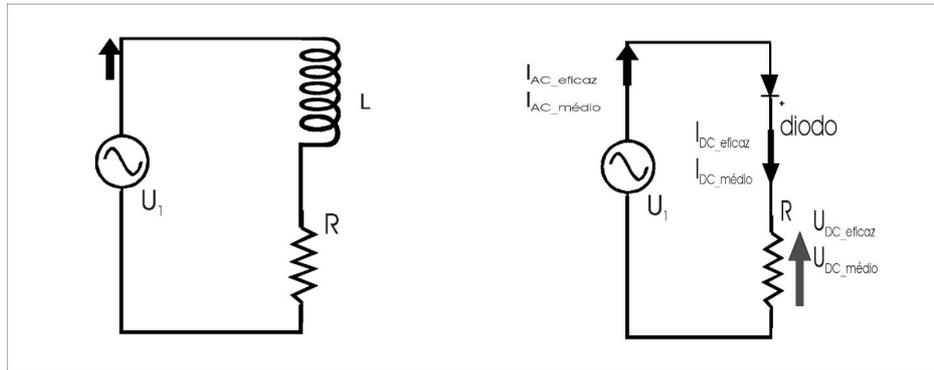
**Figura 4.3 – Circuitos para comparação.**
Fonte: (autoria própria)

Chama-se retificador o dispositivo destinado para a transformação direta da corrente alternada em corrente contínua. Neste caso o circuito utilizado é o mais simples retificador de meia onda, cujo elemento não linear é o diodo que atua como uma válvula. No semiciclo positivo da tensão alternada da rede o diodo conduz a corrente elétrica e no semiciclo negativo ele a interrompe.

Essa forma de operação produz uma corrente não senoidal que pode ser decomposta nas suas componentes harmônicas.

Como somente a forma de onda de corrente sofre deformação devido à operação do diodo (premissa fundamental) ela pode ser decomposta em componentes segundo a expressão 4.43.

$$i(t) = I_0 + \sum_{1}^{n} I_{nm} * sen(nwt + y_n) \qquad (4.43)$$

A Figura 4.4 a seguir ilustra a decomposição do sinal de saída do retificador de meia onda: em vermelho a corrente contínua pulsante característica do retificador de meia onda, em azul a componente contínua, em verde e laranja as componentes harmônicas associadas. A harmônica fundamental está em destaque representada pela onda em verde e responde pela potência ativa do circuito. As demais harmônicas somadas são representadas pela ondulação em laranja e não influenciam na potência ativa.
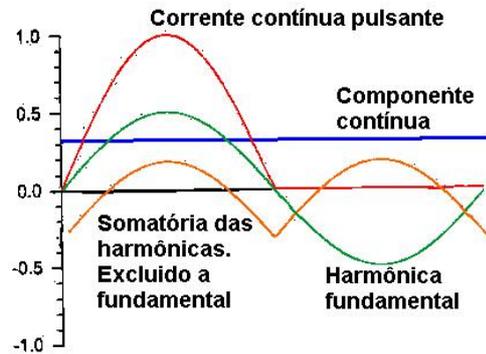
**Figura 4.4 – Decomposição da onda de corrente.**
Fonte: (autoria própria, baseada em EICHELBERGER, 2009).

As primeiras componentes no estudo do circuito retificador de meia onda extraídas da expressão anterior determinam as seguintes expressões indicadas em 4.44:

$$I_{DC} = \frac{I_m}{p} \quad \text{e} \quad I_{DC_eficaz} = \frac{I_m}{2} \qquad (4.44)$$

Onde:

$I_{DC}$ é o valor médio da corrente retificada que flui pela resistência R ligada em série com o diodo e corresponde a componente contínua $I_0$ da série de Fourier. Está representada em azul na Figura 4.4.

$I_{DC_eficaz}$ é o valor eficaz da corrente retificada que flui pela resistência R ligada em série com o diodo. Corresponde ao valor eficaz equivalente ao efeito de todos os componentes harmônicos e da componente contínua da corrente sobre a resistência. Dessa forma determina a potência ativa do circuito.

$I_m$ é o valor máximo (ou de pico) da corrente. Através desse valor todos os outros se relacionam.

A tensão de saída do retificador de meia onda tem forma similar à da corrente e por isso as expressões matemáticas utilizadas para caracteriza-la são semelhantes:

$$U_{DC_média} = \frac{U_m}{p} \quad \text{e} \quad U_{DC_eficaz} = \frac{U_m}{2} \qquad (4.45 \text{ e } 4.46)$$

Onde:

$U_{DC_eficaz}$ é o valor eficaz da tensão retificada, aplicada nos terminais da resistência R.

$U_{DC_média}$ é o valor médio da tensão retificada, aplicada nos terminais da resistência R e corresponde a componente contínua $U_0$ da série de Fourier.

Outro valor importante para os cálculos é o valor eficaz da tensão da fonte senoidal $U_{AC_eficaz}$. Esse valor se relaciona às expressões definidas para o retificador de meia onda através da seguinte expressão que contém o valor de pico da tensão senoidal da fonte $U_m$:

$$U_m = \sqrt{2} * U_{AC_eficaz} \quad (4.47)$$

Essas expressões permitem o cálculo do fator de potência desse retificador.

A potência ativa é calculada pelo produto dos valores eficazes da tensão e da corrente na saída do retificador. A potência aparente é calculada pelo produto do valor eficaz da tensão da fonte senoidal pelo valor eficaz da corrente de saída da mesma. Devido à ligação série do circuito o valor eficaz da corrente é o mesmo na entrada e saída do circuito retificador e isso permite simplificar a expressão para obter uma relação de tensões.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{U_{DC_eficaz} * I_{DC_eficaz}}{U_{AC_eficaz} * I_{AC_eficaz}} \quad (4.48)$$

Como:

$$I_{DC_eficaz} = I_{AC_eficaz}$$

$$FP = \frac{U_{DC_eficaz}}{U_{AC_eficaz}} \quad (4.49 \text{ e } 4.50)$$

Onde:

$U_{AC_eficaz}$ é o valor eficaz da tensão da fonte senoidal.

$I_{AC_eficaz}$ é o valor eficaz da corrente na saída da fonte de corrente alternada senoidal e neste caso é igual ao valor eficaz da corrente retificada $I_{DC_eficaz}$.

*FP* é o fator de potência da carga não linear que abrange o diodo e a resistência.

Dispondo das expressões anteriores é possível simplificar a fórmula acima até obter um valor numérico para o fator de potência:

$$U_{DC_eficaz} = \frac{\sqrt{2} * U_{AC_eficaz}}{2}$$

$$FP = \frac{\frac{\sqrt{2} * U_{AC_eficaz}}{2}}{U_{AC_eficaz}} = \frac{\sqrt{2} * U_{AC_eficaz}}{2 * U_{AC_eficaz}} = 0{,}71 \qquad (4.51)$$

A aplicação em um exemplo numérico pode demonstrar melhor o procedimento de cálculo envolvido na comparação.

Supondo que em um circuito elétrico alimentado por um gerador de corrente alternada senoidal de freqüência 60 Hz, tensão 100 V se necessita produzir um trabalho à razão de 100 J por segundo ou 100W de potência.

Iniciando pelo cálculo do circuito não linear existe somente um parâmetro a ser calculado que é o valor da resistência.

O valor da resistência se calcula através da relação entre a potência ativa e o valor eficaz da tensão do lado retificado. Como o valor dado é o valor eficaz da tensão senoidal da fonte é necessário deduzir uma expressão para o cálculo do valor da resistência a partir dos dados disponíveis.

$$P = \frac{U_{DC_eficaz}^{2}}{R}$$

$$U_{DC_eficaz} = \frac{\sqrt{2} * U_{AC_eficaz}}{2}$$

$$P = \frac{\left(\frac{\sqrt{2} * U_{AC_eficaz}}{2}\right)^{2}}{R} = \frac{2 * U_{AC_eficaz}^{2}}{4 * R} = \frac{U_{AC_eficaz}^{2}}{2 * R} \qquad (4.52 \text{ a } 4.54)$$

Com os valores dados:

$$R = \frac{U_{AC_eficaz}^{2}}{2 * P} = \frac{100^{2}}{2 * 100} = 50\Omega \qquad (4.55)$$

A condição para o cálculo do circuito linear é que o fator de potência seja igual ao do circuito não linear, ou seja, igual a 0,71. Isso implica em um ângulo de defasagem de 45°, cuja tangente é igual a um e, portanto o valor da reatância indutiva deve ser igual ao valor da resistência, conforme indicado pelas expressões matemáticas a seguir.

$$\cos\varphi = 0{,}71$$
$$\varphi = \arccos\varphi = 45^0$$
$$\tan\varphi = \tan 45^0 = 1$$
$$\tan\varphi = \frac{X_L}{R}$$
$$\frac{X_L}{R} = 1$$
$$X_L = R \qquad (4.56 \text{ a } 4.61)$$

O exemplo é dado em função da potência 100W (considerada como o trabalho útil) e da tensão de alimentação do circuito de 100 V. Com esses dados é possível calcular todos os parâmetros do circuito linear.

$$P = U * I * \cos\varphi$$
$$I = \frac{P}{U * \cos\varphi} = \frac{100}{100 * 0{,}71} = 1{,}408A$$
$$Z = \frac{U}{I} = 71{,}02\Omega$$
$$R = Z * \cos\varphi = 71{,}02 * \cos 45^0 = 50{,}2\Omega$$
$$X = Z * sen\varphi = 71{,}02 * sen 45^0 = 50{,}2\Omega$$
$$L = \frac{X_L}{2 * \pi * f} = \frac{50{,}2}{2 * \pi * 60} = 133{,}1mH \qquad (4.62 \text{ a } 4.67)$$

Dessa forma se projetaram três circuitos para estudo comparativo: um circuito formado somente por uma resistência de 100 ohms, um com carga linear formada por uma resistência de 50 ohms e uma indutância de 133mH e outro com carga não linear formada por uma associação série de um diodo com uma resistência de 50 ohms, conforme ilustra a Figura 4.5. Nas simulações, para considerar algum efeito de perdas no alimentador foi admitida uma linha de transmissão que interliga a fonte e a carga representada por uma resistência de um ohm.
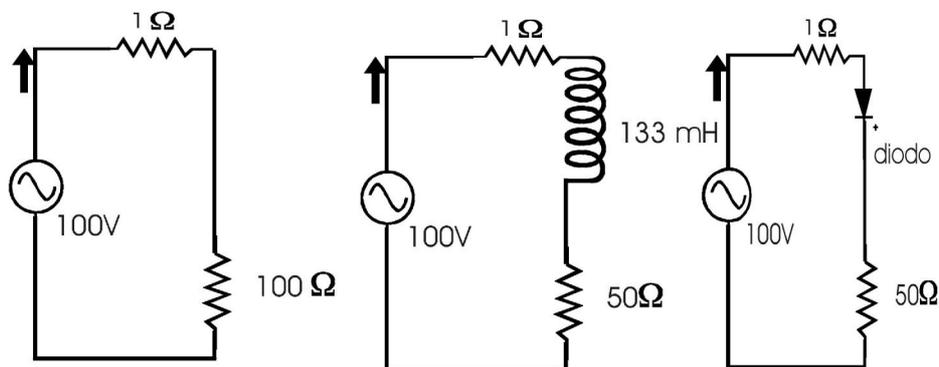
**Figura 4.5 -: Três circuitos, da esquerda para a direita, dois lineares, o primeiro praticamente resistivo, o segundo substancialmente indutivo, o terceiro é não linear.**
Fonte: (autoria própria)

A tabela 4.1 mostra os resultados obtidos nas simulações.

Tabela 4.1 – Resultados das simulações

| Circuito | Perda estimada na linha [W] | Potência.ativa Útil [W] | Resistência de carga útil [ohm] | Indutância [mH] | Resistência de perdas na linha [ohm] | Fator de potência |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Resistivo | 0,976 | 97,61 | 100 | 1 | 1 | 1 |
| Indutivo | 2,013 | 98,30 | 50 | 133 | 1 | 0,7 |
| Não linear | 1,884 | 94,95 | 50 | 0 | 1 | 0,7 |

Fonte: Autoria própria.

Tais resultados são compatíveis com a descrição teórica desses circuitos e aponta um comportamento similar entre o circuito indutivo linear e o circuito não linear com diodo, do ponto de vista da perda na linha que é aproximadamente o dobro do circuito resistivo de referência.Observa-se também que para produzir o mesmo trabalho útil que no circuito resistivo é necessário diminuir o valor da resistência de carga útil e por isso aumentar a corrente. Com isso a perda na linha aumenta na proporção inversa ao fator de potência e ajuda a compreender o motivo para cobrança de multas. O valor dessas multas não está vinculado diretamente à perda de energia, pois o valor desta varia, grosso modo, com a resistência da linha que em última instância depende da a qualidade dos materiais utilizados. Nas simulações se o valor da resistência considerada para a linha de transmissão fosse um décimo do utilizado, o valor das perdas seriam menores

na mesma proporção. Ampliando a análise no domínio da freqüência, é possível observar melhor as relações entre as principais grandezas envolvidas.

No circuito não linear haverá uma corrente contínua pulsante que pode ser decomposta em uma componente contínua e por uma componente alternativa constituída da somatória das harmônicas, de acordo com a série de Fourier.

$$i(t) = I_0 + \sum_{1}^{n} I_{nm} * sen(nwt + y_n) \qquad (4.68)$$

Dessa expressão podemos distinguir dois elementos: a componente contínua e a componente alternada composta pela somatória de todos os harmônicos.

Calculando a potência dissipada no resistor para cada componente, podemos determinar uma relação simples entre elas:

$$P = P_{DC} + P_{AC}$$
$$P_{DC} = R * I_{DC_média}^2$$
$$P_{AC} = R * I_{AC}^2$$
$$P = R * I_{DC_eficaz}^2 = R * I_{AC_eficaz}^2 \qquad (4.69 \text{ a } 4.72)$$

Onde:

$P$ é a potência ativa total dissipada na resistência;

$P_{DC}$ é a potência dissipada na resistência devido a componente contínua da corrente (valor médio);

$P_{AC}$ é a potência dissipada na resistência devido a componente alternada da corrente (somatória das harmônicas);

$I_{DC_média}$ é a componente contínua da corrente;

$I_{AC}$ é a componente alternada da corrente retificada (somatória das harmônicas) e constitui a ondulação. Corresponde ao valor eficaz equivalente ao efeito de todas as harmônicas;

$I_{DC_eficaz}$ é o valor eficaz da corrente contínua pulsante e corresponde ao valor eficaz da primeira harmônica;

$R$ é a resistência percorrida pela corrente contínua pulsante.

Substituindo as potências e simplificando:

$$R * I_{DC_eficaz}^2 = R * I_{DC_média}^2 + R * I_{AC}^2$$
$$I_{DC_eficaz} = \sqrt{I_{DC_média}^2 + I_{AC}^2} \qquad (4.73)$$

O valor da componente contínua, calculado para um circuito deste tipo é:

$$I_{DC_médio} = \frac{U_{AC_eficaz} * \sqrt{2}}{p * R} = \frac{100 * \sqrt{2}}{p * 50} = 0{,}9A \qquad (4.74)$$

O valor eficaz da corrente retificada é:

$$I_{AC_eficaz} = I_{DC_eficaz} = \frac{U_{AC_eficaz} * \sqrt{2}}{2 * R} = \frac{100 * \sqrt{2}}{2 * 50} = 1{,}41A \qquad (4.75)$$

O valor eficaz da componente alternada da corrente retificada é (somatório das harmônicas) é:

$$I_{AC} = \sqrt{I_{DC_eficaz}{}^{2} - I_{DC_média}{}^{2}} = \sqrt{1{,}41^{2} - 0{,}9^{2}} = 1{,}09A \qquad (4.76)$$

A potência aparente é calculada pelo produto do valor eficaz da tensão da fonte pelo valor eficaz da corrente é:

$$S = U * I_{AC_eficaz} = 100 * 1{,}41 = 141VA \qquad (4.77)$$

O valor da potência ativa é calculado pelo produto da resistência pelo valor eficaz da corrente elevado ao quadrado.

$$P = R * I_{DC_eficaz}{}^{2} = R * I_{AC_eficaz}{}^{2} = 50 * 1{,}41^{2} = 99{,}4W \qquad (4.78)$$

Esta potência pode ser divida nas componentes contínua e alternada (ondulações), válido somente na saída do retificador, pois em sua entrada somente existe a componente fundamental da tensão.

O valor da potência oriunda da componente contínua é calculado pelo produto da resistência pelo valor médio da corrente elevado ao quadrado.

$$P_{DC} = R * I_{DC_média}{}^{2} = R * I_{AC_eficaz}{}^{2} = 50 * 0{,}9^{2} = 40{,}5W \qquad (4.79)$$

O valor da potência oriunda da componente alternada é calculado pelo produto da resistência pelo valor eficaz da corrente elevado ao quadrado.

$$P_{AC} = R * I_{AC}{}^{2} = R * I_{AC}{}^{2} = 50 * 1{,}09^{2} = 59{,}4W \qquad (4.80)$$

A soma destas componentes corresponde à potência ativa do circuito.

O fator de potência pode ser calculado pela relação do valor obtido em 4.78 (valor de P) com o obtido em 4.77 (valor de S):

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{99,4}{141} = 0,7 \qquad (4.81)$$

É possível calcular o valor da componente harmônica fundamental de corrente $I_1$ aplicando a expressão deduzida para a potência ativa:

$$P = V_1 * I_1 * \cos j_1 \qquad (4.82)$$

Considerando que o valor eficaz da onda fundamental tensão é igual à tensão da fonte senoidal de 100V, o fator de potência unitário na carga (resistência) e que a potência ativa do circuito é de 100W, o valor eficaz da componente harmônica fundamental de corrente calculado através da expressão 4.82 é igual a 1,00 A. Baseado na premissa que a tensão da fonte não se deforma pelo efeito da carga, somente a harmônica fundamental produzirá potência ativa no sistema, isso se explica a seguir, no sinal decomposto.

O produto da componente contínua pela senóide de tensão da rede resulta em um sinal alternado simétrico, cujo valor médio é nulo. Por outro lado, o produto da ondulação resultante da somatória das outras harmônicas pela senóide da tensão também produz uma onda simétrica cujo valor médio é nulo. A Figura 4.6 ilustra essa afirmação.
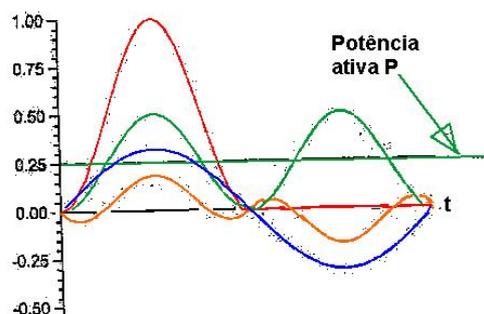
**Figura 4.6 – Representação dos produtos da tensão senoidal pelas componentes da corrente.**
Fonte: (autoria própria, baseada em EICHELBERGER, 2009).

O valor médio da senóide que corresponde ao produto da componente fundamental da corrente pela tensão da rede determina a potência ativa indicada em verde no diagrama. A corrente contínua pulsante multiplicada pela tensão senoidal da fonte dá origem a

onda em vermelho, cujo valor médio por definição corresponde ao valor da potência ativa e coincide com o valor médio da senóide em verde.

A onda azul que corresponde ao produto da componente contínua pela tensão da fonte resulta em onda simétrica de valor médio nulo.

A onda laranja que corresponde ao produto das harmônicas pela tensão da fonte resulta em onda simétrica de valor médio nulo.

O baixo fator de potência se deve a existência de componentes que não contribuem para a potência ativa, mas influenciam a potência aparente, o que é similar ao comportamento de indutores e capacitores. Entretanto a natureza dessa influência é diferente, pois no caso deste circuito não linear, não existe armazenamento de energia e troca com o sistema e por isso embora se possa mensurar um valor para a potência reativa ela não se relaciona simplesmente com os reativos indutivos e capacitivos.

Isso determina um procedimento para a correção do fator de potência diferente da simples colocação de um capacitor no circuito.

Ampliando o estudo da série de Fourier, através da observação da distribuição espectral, observamos a proporção das várias harmônicas, com predominância nas freqüências abaixo de 180 Hz (terceira harmônica), e a componente contínua que é o motivo básico para a aplicação de um circuito retificador. A Figura 4.7 ilustra a distribuição da corrente no espectro de freqüências.
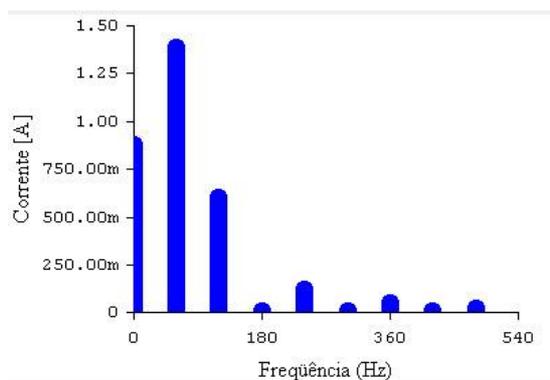
**Figura 4.7 – Distribuição da corrente no espectro de freqüências.**
Fonte: [Autoria própria]

Por isso em um sistema constituído por elementos lineares e não lineares o cálculo do fator de potência deve se basear na avaliação das potências ativa e aparente. Isso implica em dispor de instrumentos e elementos de cálculo que possam determinar a potência ativa a partir do valor médio da potência instantânea e a potência aparente como o produto dos valores eficazes reais da tensão e da corrente. Deve se observar, portanto o tipo de instrumento empregado, por exemplo, o wattímetro eletrodinâmico de

ponteiro fornece uma leitura confiável, dentro do seu espectro de freqüência. Da mesma forma instrumentos de ferro móvel fornecem indicação do valor eficaz. Assim se percebe que nos laboratórios e nos meios técnicos capacitados a medição confiável de circuito contendo carga não linear é viável mesmo sem os modernos instrumentos digitais, desde que se observe a característica de operação desses equipamentos.

### 4.3.1. Potência ativa e potência instantânea.

Outra forma de analisar os circuitos pode ser através da observação do comportamento da potência, a Figura 4.8 apresenta as curvas da potência instantânea simulada para as três cargas analisadas.
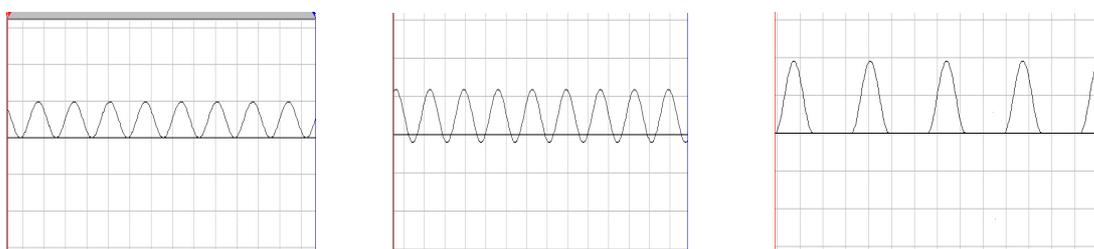
**Figura 4.8 -: Curvas de potência instantânea para os três circuitos simulados.**
Fonte: [Autoria própria]

Os gráficos da esquerda para a direita correspondem ao circuito resistivo, indutivo e não linear respectivamente. As escalas são 200W/divisão (no eixo vertical) e 5ms/divisão (no eixo horizontal).

Embora a potência ativa seja a mesma nas três situações, pois os circuitos foram projetados para isso, o comportamento da potência instantânea é diferente para cada uma delas. Observa-se que o maior pico de potência ocorre no caso não linear, o que é compreensível, pois existem períodos em que a potência instantânea é nula e como o valor médio deve permanecer o mesmo deverá haver uma compensação. Fenômeno similar se observa na curva do circuito indutivo onde o pico de potência é maior que no resistivo compensando o deslocamento no eixo vertical, conforme se observa no gráfico central da Figura 4.8.

Também se evidencia o principal defeito do retificador de meia onda que determina seu baixo fator de potência. A potência é transmitida somente em uma pare do período da tensão da rede havendo um aproveitamento pobre da capacidade do sistema para fornecer energia.

Conforme já estabelecido anteriormente a potência reativa que se atribui ao circuito linear tem natureza física diversa daquela associada ao circuito não linear e por isso não pode ser utilizada na base matemática clássica para correção do fator de potência. Entretanto a potência ativa tem a mesma natureza independentemente do circuito na qual foi medida.

Através da combinação dos três circuitos, dois a dois, é possível se estudar como essas cargas se relacionam e como isso afeta o triângulo de potências. Quando combinados em paralelo cada um dos circuitos lineares com o circuito não linear resulta nas curvas de potência instantânea das Figuras 4.9 e 4.10.

No caso da associação do circuito resistivo com o não linear a curva da potência instantânea resultante corresponde à soma das curvas dos dois circuitos separados, conforme ilustra a Figura 4.9.
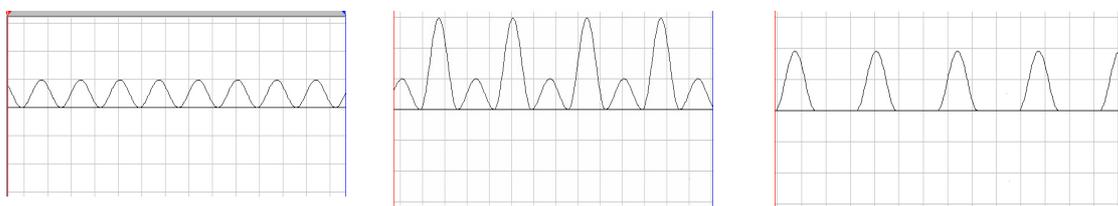
**Figura 4.9 - Curvas de potência instantânea para a associação do circuito resistivo com o não linear.**
Fonte: [Autoria própria]

Da esquerda para a direita correspondem ao circuito resistivo simples, a associação do resistivo com o não linear e o circuito não linear simples. As escalas são 200W/divisão (no eixo vertical) e 5ms/divisão (no eixo horizontal).

O gráfico central mostra o comportamento da potência instantânea resultante para a associação dos circuitos. O valor médio dessa potência (potência ativa) é 189,4W e corresponde ao que seria medido por um wattímetro, sendo igual à soma das potências ativas de cada circuito envolvido (96,1W para o circuito resistivo e 93,3W para o não linear). Em princípio nada se pode dizer sobre as potências aparente e reativa.

No caso da associação do circuito indutivo com o não linear a potência instantânea exibe comportamento similar ao caso anterior, conforme ilustra a Figura 4.10.

.
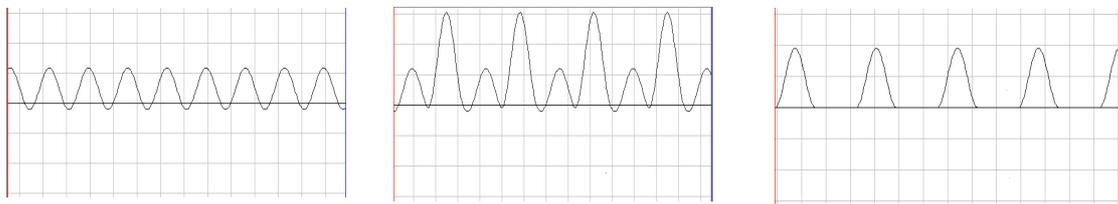
**Figura 4.10 - Curvas de potência instantânea para a associação do circuito indutivo com o não linear.**
Fonte: [Autoria própria]

Da esquerda para a direita corresponde ao circuito indutivo, a associação e não linear. As escalas são 200W/divisão (no eixo vertical) e 5ms/divisão (no eixo horizontal).

Da mesma forma que o caso anterior o gráfico central mostra o comportamento da potência instantânea resultante para a associação dos circuitos. O valor médio dessa potência (potência ativa) é 188,3W e corresponde ao que seria medido por um wattímetro, sendo igual à soma das potências ativas de cada circuito envolvido (94,7W para o circuito indutivo e 93,6W para o não linear). Em princípio nada se pode dizer sobre as potências aparente e reativa.

A soma das potências ativas dos circuitos é adequada para expressar a potência ativa do conjunto. Isso é coerente com a premissa de que a potência ativa exprime um trabalho realizado, uma transformação energética independente da natureza do circuito.

A potência reativa sem levar em conta a natureza da carga, não é adequada como grandeza auxiliar nos cálculos envolvendo elementos não lineares. Por outro lado, as potências ativa e aparente, desde que avaliadas corretamente podem servir de indicador da presença de cargas não lineares, em um circuito que contenham somente cargas resistivas. Nas instalações normais dificilmente se pode alcançar tal configuração ou mesmo adota-la como premissa de modo que outro indicador é necessário para o sistema de medição.

Tais considerações servem para pautar que tipo de cuidado deve ser observado ao avaliar circuitos que contem elementos não lineares, à luz da teoria clássica de circuitos elétricos.

Mesmo tendo à disposição um instrumento capaz de indicar a potência ativa e os valores eficazes reais, a avaliação de fator de potência somente poderá ser feita pelo conjunto das cargas envolvidas. Isso se deve ao fato de que embora a soma das parcelas de potência ativa de cada carga seja válida, a soma das potências reativas pode não ser. Não obstante se for possível determinar a potência aparente do conjunto o fator de

potência pode ser obtido a partir da soma das parcelas de potência ativa de cada carga, através da relação expressa em 4.83:

$$FP = \frac{\sum P_i}{S} \qquad (4.83)$$

Onde $P_i$ é a potência ativa de cada carga e $S$ é a potência aparente do conjunto.

Os medidores eletrônicos ao serem ligados na origem da instalação se localizam estrategicamente no ponto de medição que satisfaz esse requisito.

A partir destas considerações, podemos determinar uma expressão que relaciona o fator de potência na freqüência fundamental com a distorção harmônica total e que pode ser útil nas avaliações dos circuitos.

Um indicador matemático para a degradação do sinal é denominado de Distorção Harmônica Total, ou $DHT_i$ sendo definido pelo quociente da raiz quadrada da somatória das harmônicas ao quadrado pelo valor da fundamental, conforme expressão a seguir.

$$DHT_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \ldots}}{I_1}$$

$$DHT_i^2 = \frac{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \ldots}{I_1^2} \qquad (4.84 \text{ e } 4.85)$$

Onde $I_1$ é a corrente na freqüência fundamental $I_2$, $I_3$, $I_4$, $I_n$ são as harmônicas e $I_0$ é a componente contínua.

Consideramos inicialmente que a tensão fornecida para a carga é isenta de harmônicas e componente contínua, ou seja, não apresenta distorção. Sendo assim somente a corrente é decomposta em suas componentes harmônicas na expressão matemática do fator de potência.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{U_1 * I_1 * \cos j_1}{U_f * \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \ldots}} = \frac{I_1 * \cos j_1}{\sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \ldots}} \qquad (4.86)$$

O numerador dessa expressão somente contém a componente fundamental da corrente para o cálculo da potência ativa, pois se a tensão é mantida senoidal as outras harmônicas e a componente contínua não contribuem para a potência ativa.

Combinando as expressões do $DHT_i$ com a do fator de potência, obtemos a relação:

$$FP = \frac{\cos j_1}{\sqrt{\frac{I_0^2}{I_1^2} + 1 + DHT_i^2}} \qquad (4.87)$$

Para ondas simétricas a componente $I_0$ é nula e a expressão se resume a:

$$FP = \frac{\cos j_1}{\sqrt{1 + DHT_i^2}} \qquad (4.88)$$

Considerando a passagem da expressão 4.87 para a 4.88 se constata que ao se eliminar a componente contínua do sinal, um dos termos do denominador que contribui para o baixo fator de potência é eliminado.

No caso do retificador analisado que corresponde ao circuito não linear em estudo, essa correção corresponde à troca do circuito meia onda para onda completa, ou seja, mudança de topologia do circuito.

## 4.4. A correção do fator de potência em circuitos que contém cargas não lineares

O fator de potência do retificador pode ser corrigido simplesmente mudando a topologia do circuito. A mudança consiste em substituir o retificador de meia onda por um retificador de onda completa em ponte.

O circuito retificador de onda completa em ponte consiste numa associação de quatro diodos cuja comutação, aos pares permite que a corrente circule na carga somente em um sentido. A Figura 4.11 ilustra a ligação do retificador em ponte.
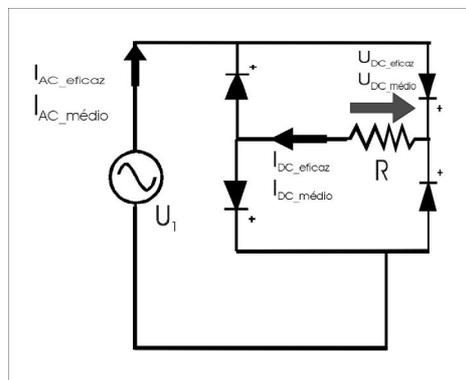
**Figura 4.11 – Circuito retificador de onda completa.**
Fonte: [Autoria própria]

A forma de onda da corrente que percorre a carga abrange os dois semiciclos e por isso as expressões definidas pelos componentes da série de Fourier utilizadas nos cálculos são diferentes:

$$I_{DC} = \frac{2 * \mathrm{I_m}}{p} \quad \text{e} \quad I_{DC_eficaz} = \frac{\mathrm{I_m}}{\sqrt{2}} \qquad (4.89)$$

A tensão de saída do retificador de meia onda tem forma similar à da corrente e por isso as expressões matemáticas utilizadas para caracteriza-la são semelhantes:

$$U_{DC_média} = \frac{2 * U_m}{p} \quad \text{e} \quad U_{DC_eficaz} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \qquad (4.90)$$

Essas expressões permitem o cálculo do fator de potência desse retificador.

A potência ativa é calculada pelo produto dos valores eficazes da tensão e da corrente na saída do retificador. A potência aparente é calculada pelo produto do valor eficaz da tensão da fonte senoidal pelo valor eficaz da corrente de saída da mesma. Devido à ligação série do circuito o valor eficaz da corrente é o mesmo na entrada e saída do circuito retificador e isso permite simplificar a expressão para obter uma relação de tensões.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{U_{DC_eficaz} * I_{DC_eficaz}}{U_{AC_eficaz} * I_{AC_eficaz}} \qquad (4.91)$$

Como:

$$I_{DC_eficaz} = I_{AC_eficaz}$$

$$FP = \frac{U_{DC_eficaz}}{U_{AC_eficaz}} \qquad (4.92 \text{ e } 4.93)$$

Onde:

$U_{AC_eficaz}$ é o valor eficaz da tensão da fonte senoidal.

$I_{AC_eficaz}$ é o valor eficaz da corrente na saída da fonte de corrente alternada senoidal e neste caso é igual ao valor eficaz da corrente retificada $I_{DC_eficaz}$.

*FP* é o fator de potência da carga não linear que abrange o diodo e a resistência.

Dispondo das expressões anteriores é possível simplificar a fórmula acima até obter um valor numérico para o fator de potência:

$$U_{DC_eficaz} = \frac{\sqrt{2} * U_{AC_eficaz}}{\sqrt{2}} = U_{AC_eficaz}$$

$$FP = \frac{U_{AC_eficaz}}{U_{AC_eficaz}} = 1 \qquad (4.94 \text{ e } 4.95)$$

Devido ao processo de comutação a corrente drenada da fonte tem a forma senoidal e em fase com a tensão de modo que o fator de potência é igual a um neste circuito. Isso é confirmado pela distribuição no espectro de freqüências da onda de corrente, conforme se observa na Figura 4.12.
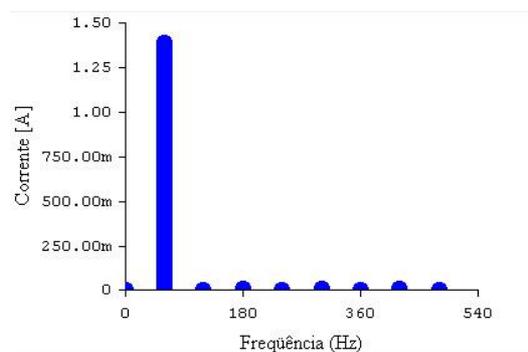
**Figura 4.12 – Espectro de freqüências do retificador de onda completa.**
Fonte: [Autoria própria]

O valor da resistência calculada é igual àquele calculado para o circuito resistivo puro, ou seja, 100 ohms. A correção do fator de potência, neste caso foi obtida pela eliminação das harmônicas de freqüência diferente da fundamental e da componente contínua observados do lado da fonte, através de uma disposição adequada da comutação do circuito.

Nem sempre se consegue a correção pela topologia do circuito, por exemplo, se houvesse um capacitor ou indutor de filtro na saída de corrente contínua.

Como a correção do fator de potência envolve a eliminação de componentes harmônicos o modo de correção pode contar ainda com o uso de filtros.

Para efeito de estudo aplicado desses filtros é importante eleger alguma carga representativa para as simulações. As lâmpadas fluorescentes compactas são um exemplo de cargas não lineares interessantes para o estudo da correção do fator de potência devido a sua disseminação nas instalações elétricas e o fato deste tipo de carga representar o comportamento da maioria dos equipamentos eletrônicos.

Atualmente existem dois grupos principais de filtros: os ativos e os passivos.

Os filtros passivos são constituídos de indutores e capacitores ligados de tal forma a eliminar as freqüências prejudiciais ao bom desempenho energético da instalação. Representam uma classe de filtros bastante diversificada, pois permite uma grande

possibilidade de ligações e por isso abrange desde os filtros simples até os mais complexos.

Uma aplicação empírica para um filtro passivo LC é na correção do fator de potência de uma lâmpada fluorescente compacta (LFC). Esse tipo de lâmpada que apresenta um ótimo rendimento luminoso traz consigo o inconveniente de possuir um fator de potência baixo.

A lâmpada utilizada nos experimentos possui as seguintes características nominais: potência nominal 15W, tensão nominal 127V, corrente nominal 235 mA, freqüência nominal 50/60 Hz e fator de potência maior que 0,5.

Os valores medidos para essa lâmpada foram:

Tabela 4.2 – Valores medidos na LFC

| Potência | 14W |
|---|---|
| Tensão de alimentação | 126,0V |
| Corrente | 199mA |
| FDP | 0,58 (cap) |
| THDI | 108,4% |
| THDU | 1,9% |

Fonte: [Autoria própria]

Para corrigir o fator de potência da lâmpada foi utilizado um filtro passa baixa, formado por um indutor variável. O indutor utilizado foi um autotransformador de relação variável utilizado em laboratórios e conhecido como "Variac".

Esse indutor foi ligado em série com a lâmpada com a finalidade de isolar as harmônicas superiores da rede através da impedância intercalada que aumenta com a freqüência.

O indutor foi ajustado até que o fator de potência ficasse o mais próximo de um e isso ocorreu em um ponto específico da escala. Acima e abaixo deste valor o fator de potência ficava aquém do ponto ótimo.

Os valores medidos para o conjunto da lâmpada fluorescente compacta com filtro foram conforme se observa na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 –Valores medidos na LFC com filtro (variac)

| Potência | 14W |
|---|---|
| Tensão de alimentação | 129,3V |
| Corrente | 119mA |
| FDP | 0,97 (ind) |
| THDI | 18,9% |
| THDU | 1,5% |

Fonte: [Autoria própria]

Neste caso se observa que o fator de potência subiu e o THDI (distorção harmônica total de corrente) diminuiu. Isso é coerente com a análise anterior que apontou a diminuição da distorção como meio para corrigir o fator de potência nesses casos.

Para comprovar o funcionamento do filtro, foi utilizada uma outra carga representada pela unidade central de processamento (sigla em inglês CPU) de um computador. Essa unidade apresenta os seguintes parâmetros em funcionamento normal, segundo a Tabela 4.4:

Tabela 4.4 – Computador (CPU)

| Potência | 65W |
|---|---|
| Tensão de alimentação | 126,1V |
| Corrente | 922mA |
| FDP | 0,59 (ind) |
| THDI | 131,5% |
| THDU | 2,1% |

Fonte: [Autoria própria]

O “Variac” foi ajustado até obter o melhor valor do fator de potência, sem que houvesse instabilidade na operação do computador, e dessa forma foram obtidos os parâmetros da Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Computador (CPU) com filtro

| Potência | 64W |
|---|---|
| Tensão de alimentação | 126,0V |
| Corrente | 586mA |
| FDP | 0,87 (ind) |
| THDI | 54,3% |
| THDU | 2,1% |

Fonte: [Autoria própria]

Uma característica observada que é coerente com a teoria é que nesses dois casos houve a diminuição do valor eficaz da corrente, sem que houvesse diminuição da potência ativa.

Esse método, porém, apresenta o inconveniente de operar numa faixa muito estreita e por isso a correção do fator de potência é restrita à carga para o qual foi ajustado. Se outra carga for ligada no mesmo circuito ou a se a potência aumentar, como no caso do computador cuja demanda varia com a tarefa executada, ocorre uma instabilidade no circuito do filtro que passa a apresentar flutuações na tensão de saída.

Uma outra configuração interessante de filtro foi obtida com um reator de lâmpada fluorescente convencional de 20W, tensão nominal 220V, corrente nominal 0,38A e fator de potência nominal 0,5. A indutância medida para esse reator foi 1,7H, através dos seguintes dados: tensão aplicada no reator 106,2V, corrente 0,171A, potência ativa 1W, potência reativa 18VAr. Esse reator foi ligado em série com um capacitor calculado para que a freqüência de ressonância do conjunto fosse 180Hz. O valor calculado foi 459nF, o valor utilizado foi 470nF, conforme ilustra a Figura 4.13.

**Figura 4.13 – Reator utilizado na correção do fator de potência de uma LFC.**
Fonte: [Autoria própria]

A LFC foi ligada em paralelo com o capacitor para se obter os seguintes valores, exibidos na Tabela 4.6:

Tabela 4.6 – LFC com filtro formado por reator convencional

| Potência | 15W |
|---|---|
| Tensão de alimentação | 128,3V |
| Corrente | 122mA |
| FDP | 0,96 (ind) |
| THDI | 18,2% |
| THDU | 1,5% |

Fonte: [Autoria própria]

A Figura 4.14, a seguir, ilustra a mudança na forma de onda da corrente sem o filtro e com o filtro.
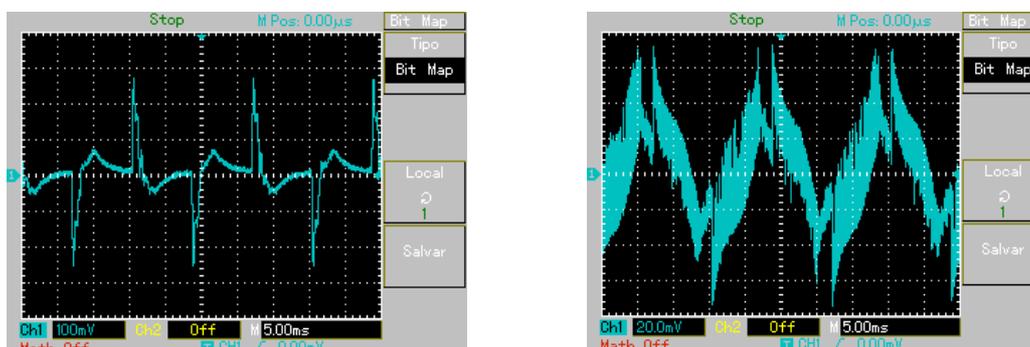
**Figura 4.14 – Formas de onda da corrente.**
Fonte: [Autoria própria]

A forma de onda da esquerda está na configuração sem filtro, a da direita com filtro. Como a escala dos gráficos é 500mA/divisão no gráfico da esquerda e 100mA/divisão para o da direita, na verdade o valor da corrente é menor neste último. A escala de tempo é 5ms/divisão.

Conforme se pode observar, sem o filtro a corrente apresenta picos em tempos de condução relativamente curtos, o que é coerente com esse tipo de lâmpada que possui um retificador de onda completa em ponte e capacitor na saída para suprir seu circuito principal. Com a introdução do reator de filtro, o pico de corrente diminuiu e o tempo de condução aumentou, bem como o fator de potência.

A filosofia para a correção do fator de potência utiliza filtragem dos componentes indesejados. A correção individual para cargas fixas pode ser feita com filtros passivos, otimizados para essa operação.

Cargas variáveis podem exigir a adoção de filtros ativos, que podem ser obtidos da composição de unidades individuais sintonizadas, comandadas por circuitos discretos até topologias eletrônicas mais complexas.

A tese com título “Correção do fator de potência para instalações de baixa potência empregando filtros ativos” apresenta uma boa introdução geral sobre o tema, situando na parte dedicada a topologias e filtros passivos. Indo além, o texto trata da correção que emprega filtros ativos, estratégias de controle e topologias culminando com a implementação prática de um inversor de tensão em ponte completa (31).

O assunto é bastante extenso, mas um ponto particularmente interessante é que o filtro ativo emprega um barramento de corrente contínua (CC), para seu funcionamento.

Considerando que muitos equipamentos hoje trabalham com fontes chaveadas que são compatíveis com alimentação por tensão contínua, essa abordagem pode ser interessante na modificação da modalidade de corrente empregada nas instalações elétricas residenciais.

Uma investigação desenvolvida nos principais equipamentos a partir do estudo de suas fontes, descrita no capítulo 6, aponta a possibilidade real de operá-los diretamente com tensão contínua de modo que o problema do fator de potência pode ser tratado por um conversor CA/CC na entrada da instalação, se essa for a melhor solução econômica.

Tratados os princípios teóricos que orientam a avaliação da demanda de potência e energia, resta saber como esses parâmetros são tratados pelos medidores, em função da evolução da tecnologia de medição. Esse é o tema do próximo capítulo.

## 5. A MEDIÇÃO DE POTÊNCIA E ENERGIA.

A medição da potência e da energia tem importância fundamental do ponto de vista técnico e como representa um custo para a sociedade, também existem implicações políticas e econômicas.

Devido a limitações técnicas e econômicas associados aos medidores, o custo da energia elétrica para o consumidor residencial corresponde somente ao trabalho realizado ou perdido na sua instalação pelo consumo de potência ativa mensurável.

Atualmente se projetam problemas nas redes cada vez mais carregadas com consumidores ávidos por energia, relacionados a picos de demanda. A evolução dos medidores permite que se faça o gerenciamento dessa demanda pelo lado do consumidor através da variação do custo da energia em função do tempo.

No caso do consumidor residencial a proposta da modalidade tarifária branca, incentiva a interagir com a rede elétrica mais ativamente ajustando seus hábitos em função do preço da energia.

Neste cenário, que já é realidade para consumidores de modalidade A, existe a necessidade da substituição dos medidores convencionais pelos eletrônicos mais modernos e que podem medir mais parâmetros.

Dentro desses parâmetros adicionais está a medição do fator de potência que se traduz para efeito de tarifas como o excedente de energia reativo.

A resolução n° 456 da ANEEL (33) já estabelece a cobrança de multas para esses casos, porém a falta de equipamentos que pudessem aferir esse valor do lado dos consumidores impede a aplicação em um universo tão vasto.

Existem mecanismos legais de medição temporária definidos por regras nessa resolução, mas a aplicação envolve problemas logísticos que não justificam a aplicação econômica em escala.

Este capítulo procura desenvolver do ponto de vista técnico uma visão geral evolutiva das tecnologias de medição, iniciando pelo medidor de potência eletromecânico até o medidor eletrônico de energia e buscando associar a perda no sistema de energia elétrica associada ao sistema de medição, que corresponde a uma perda comercial.

Esta é uma das formas de observar como as limitações técnicas concorrem com as pressões econômicas para definir o cenário presente e futuro das redes e instalações elétricas.

## 5.1. A medição de potência

### 5.1.1. O medidor eletromecânico

Trata-se de uma tecnologia clássica, porém precisa na determinação da potência ativa, que funciona pelo deslocamento produzido pela interação de fluxos magnéticos produzidos por bobinas influenciadas pelo circuito de medição.

Nas instalações de corrente contínua constante geralmente não se utilizam os wattímetros, pois a potência pode ser determinada facilmente pelas indicações de um voltímetro e de um amperímetro, pois nesses casos o valor corresponde ao produto dessas duas grandezas, conforme exposto no capítulo 4. (Isso simplifica a aplicação de conversores de sinais analógicos para digital e micro-controladores, de modo que os medidores produzidos para essa finalidade são mais simples).

Por outro lado, nas instalações de corrente alternada o wattímetro é indispensável, pois a potência ativa depende, além da tensão e da corrente, também da defasagem entre elas. Na qualidade de aparelhos de laboratório e portáteis se utilizam os wattímetros eletrodinâmicos (28). Estes aparelhos têm basicamente dois circuitos de medição: o circuito de corrente que se liga em série com a carga, da mesma forma que um amperímetro, e o circuito de tensão, ligado em paralelo com a mesma.

Dentro do wattímetro existe a bobina de corrente e a bobina de tensão, correspondentes aos dois circuitos citados. Nesta configuração através de uma das bobinas do wattímetro passa a mesma corrente que na carga, enquanto o circuito paralelo sofre a influência da mesma tensão que a carga. Esses elementos são representados de modo simplificado na Figura 5.1 pela bobina pela bobina azul, para o circuito de corrente e pela bobina vermelha, para a bobina do circuito de tensão.

A bobina de corrente (azul) geralmente é fixa, tendo poucas espiras de fio grosso está subordinada à ação da corrente que circula pela carga. Nesta configuração o fluxo produzido por essa bobina está em fase com a corrente na carga.

A bobina de tensão (vermelha) é móvel e a corrente que circula por ela deve estar em fase com a tensão aplicada na carga. Para que isso ocorra o valor de sua reatância deve ser menor que a resistência colocada em série com ela de modo que o conjunto possa ser considerado resistivo.

O torque de rotação do mecanismo de medição do wattímetro, representado por $M$ na figura 5.1, deve ser proporcional ao produto das intensidades de corrente nas bobinas

móvel e fixa e ao fator de potência da carga. Esse torque é produzido quando os fluxos magnéticos produzidos pelas bobinas interagem provocando o deslocamento da bobina móvel.

Essa bobina é sustentada por um eixo apoiado em mancais em cujas extremidades são fixadas molas para controlar o deslocamento desse sistema móvel.

Como o deslocamento em uma mola é proporcional ao produto de sua constante elástica pela força aplicada, quanto maior o torque gerado maior o deslocamento. Esse deslocamento é medido sobre uma escala graduada disposta atrás de um ponteiro estrategicamente colocado para essa finalidade.

Devido à inércia mecânica esse sistema tem a característica de responder ao valor médio do torque aplicado, quando submetido a vibrações mecânicas como aquelas produzidas pela interação da bobina de corrente com a de tensão. A interação das bobinas produz um torque proporcional ao produto dos valores instantâneos da tensão e da corrente. Esse torque produziria um movimento oscilatório se o mecanismo pudesse acompanhar com o dobro da freqüência da rede no caso de uma carga linear alimentada por uma fonte senoidal.

Como o sistema mecânico responde ao valor médio do torque aplicado, o deslocamento será proporcional à potência ativa, sendo geralmente indicado através do deslocamento do ponteiro fixado na parte móvel.

Uma escala graduada com os valores da potência ativa é colocada atrás do ponteiro de modo que se possa obter as leituras do instrumento, quando ocorre o deslocamento.

Ao variar o sentido da corrente em ambas as bobinas do wattímetro, a direção do momento de rotação continua a mesma. Mas se trocar de lugar no circuito os bornes de um dos circuitos do wattímetro a fase relativa da corrente na respectiva bobina do aparelho varia de 180°, logo muda a direção do momento de rotação e o ponteiro do aparelho fica à esquerda do ponto zero da escala. Essa propriedade é particularmente útil na operação de geradores.

Para impedir a possibilidade de ligação incorreta dos circuitos, nos wattímetros se identificam seus terminais (28).
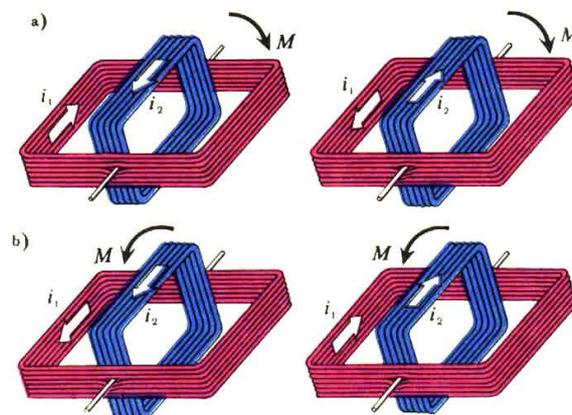
**Figura 5.1 – Representação simplificada do medidor eletrodinâmico.**
Fonte: (KASSATKIN, 1980)

## 5.1.2. O medidor eletrônico

Fundamentalmente a medição da potência envolve o produto de duas grandezas mensuráveis, a tensão e corrente. Se os valores utilizados neste produto são instantâneos a potência obtida também o será.

Os medidores eletromecânicos fazem internamente essa operação a partir de processos físicos exibindo um resultado final que corresponde ao valor médio da potência instantânea.

Essa configuração possui limite de freqüência relativamente baixo para as aplicações industriais e residenciais modernas que utilizam dispositivos eletrônicos.

Com o crescente interesse em conservação da energia, aumentou a demanda por fontes de energia elétrica mais eficientes, que operam com elementos chaveados de alta freqüência e por isso os equipamentos de medição atuais têm de superar os limites dos medidores mais antigos.

A fim de superar o limite de freqüência os fabricantes de instrumentos desenvolveram o medidor de potência baseado na tecnologia de amostragem digital.

Os wattímetros digitais empregam várias técnicas para amostrar as ondas de tensão e corrente e assim representar a variação instantânea da potência. De modo diverso dos instrumentos analógicos, a tecnologia digital é apresentada ao usuário como uma caixa preta, possivelmente motivada pelas variações das técnicas de amostragem e os direitos de propriedade e patentes. Entretanto alguma informação ainda é obtida pela pesquisa em dados de catálogo e textos acadêmicos e relativos a patentes.

Por exemplo, a figura 5.2 ilustra o diagrama de bloco de um wattímetro digital do fabricante Yokogawa. Ele se compõe de três unidades de medição, uma para cada fase de um circuito trifásico. Cada unidade de medição é composta de uma seção de entrada (input section), placa RMS (RMS board), placa A-D (AD board), placa CPU (CPU board), etc.
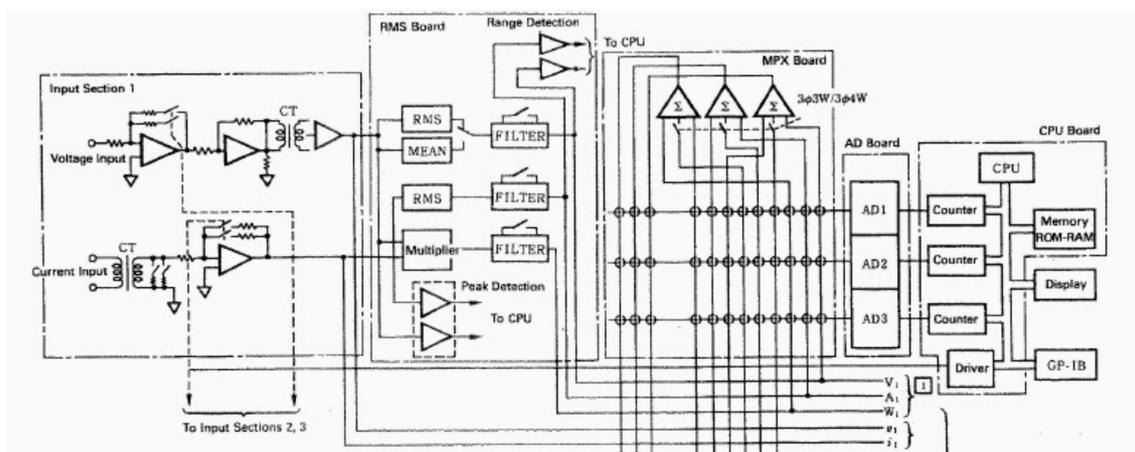
**Figura 5.2 -Diagrama de bloco de wattímetro YEW**
Fonte: (YEW)

O princípio de funcionamento desses equipamentos envolve uma série de condicionamentos da amostra de sinal que representa a grandeza medida, tensão ou corrente.

Iniciando pelo circuito de tensão, é retirada uma amostra de sinal do circuito a ser medido que é introduzido na entrada correspondente do wattímetro digital. Isso pode ser feito diretamente, se estiver dentro do alcance do aparelho, ou indiretamente através de transformador de potencial, divisor de tensão, etc.

Dentro do wattímetro, a tensão da entrada é modificada para uma corrente constante no pré-amplificador usado como seção de entrada (input section) e isolada por meio de um transformador de corrente CT. O enrolamento primário da entrada de corrente é fixo e o ganho do pré-amplificador é alterado no circuito de entrada de corrente. Com esse arranjo, o circuito primário não é aberto quando a escala de corrente é selecionada, permitindo operações seguras por controle remoto via GPIB ou RS-232.

O sinal de saída correspondente à tensão ou a corrente é sujeita a computação para obter valor eficaz real usando o método logaritmo e antilogaritmo (log-antilog) ou um método denominado pelo fabricante como “mean rectication rms value computation” na placa RMS. Esses métodos se encontram em módulos separados e selecionáveis por um comutador (blocos RMS e “mean” da figura 5.2). O detalhe da operação desta etapa de

tensão, assim como a de corrente não é imprescindível neste estudo, pois o objetivo final que é obter o valor eficaz real pode ser alcançado por outros meios.

Esse instrumento indica o valor da potência ativa, aparente e o fator de potência em um “display” digital de “leds”. Por isso ele possui os blocos para medir valor eficaz da tensão e da corrente, no entanto o circuito fundamental para esse estudo é o multiplicador.

Para contornar o problema da velocidade de processamento nos sistemas digitais pode se utilizar um circuito multiplicador que fornece um sinal analógico na saída correspondente ao produto de dois sinais presentes na entrada. Assim, mesmo um sistema computacional menos veloz pode medir o valor médio do sinal e indicar a potência ativa.

O circuito multiplicador se vale de um princípio cuja denominação em inglês é “Feedback Time Division Multiplier System” para as medições de potência. Para assegurar banda larga e alta precisão, ele possui freqüência de “clock” relativamente alta, na ordem de 125 kHz, sendo ajustada em conjunto com um dispositivo de comutação MOS de alta velocidade.

A aplicação deste conceito implica em fazer a amplitude média do sinal de saída proporcional ao produto de duas grandezas. Uma grandeza contribui para o produto obtido na saída através da modulação do tempo de condução. A outra grandeza modula a amplitude. O pulso assim obtido tem uma área que corresponde ao produto da tensão pela corrente. Esse sinal é aplicado a um amplificador de saída que atua como um filtro passa baixa freqüência (integrador) e dessa forma o sinal médio obtido na saída é proporcional ao produto dos dois sinais. Esse conceito aparece em artigos como o de autoria de E. A. Goldberg, “A High Accuracy Time Division Multiplier”, RCA Review, Volume XIII, pp.265-274, Setembro, 1952 (36).

Esse princípio foi abordado por A. Fuchs e H. Gafni no artigo “A solid state time-division multiplier” (36), e permitiu realizar simulações de funcionamento do circuito com algumas adaptações, necessárias para superar algumas questões práticas dos circuitos eletrônicos reais.

#### 5.1.2.1. O circuito multiplicador (Feedback Time Division Multiplier System)

O diagrama de blocos do circuito multiplicador é dado na figura abaixo. Uma das variáveis, X no caso, modula a partição do tempo de uma forma de onda retangular

gerada pelo circuito fechado L (representado dentro das linhas tracejadas). A tensão X e outra comutada pela chave S1 entre os valores de referência K e –K são somadas na entrada do circuito integrador I.
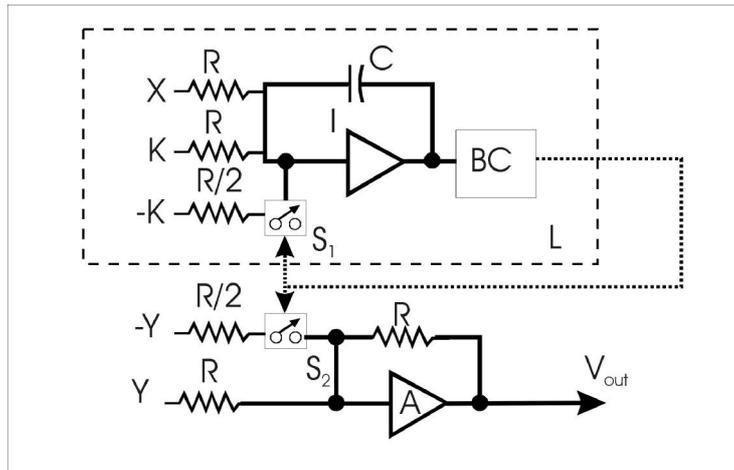
**Figura 5.3 – Diagrama de bloco de um circuito multiplicador**
Fonte: (FUCHS, GAFNI, 1962)

O sinal integrado no tempo resultante na saída (figura a seguir) é aplicado a um bloco comparador BC composto de um circuito bi-estável sensível à tensão, que muda de estado quando a entrada alcança os limites E e –E. Este circuito fornece sinais para as chaves eletrônicas $S_1$ e $S_2$.
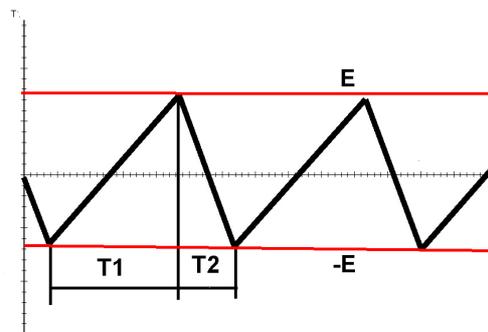
**Figura 5.4 – Forma de onda na saída do integrador**
Fonte: (Autoria própria)

A segunda variável Y, e seu negativo – Y são comutadas por S2 na entrada do amplificador A configurado como filtro passa baixa. Uma saída proporcional ao produto XY é obtida. Os períodos de tempo T1 e T2 necessários para que a saída do integrador se eleve e caia entre +E e –E, podem ser expressos matematicamente como:

$$T1 = \frac{2ERC}{K - X} \quad \text{e} \quad T2 = \frac{2ERC}{K + X} \qquad (5.1 \text{ e } 5.2)$$

Onde R e C são os elementos integrantes do circuito. O valor médio da saída do amplificador A é igual a:

$$V_{out} = \frac{YT - 2YT_2}{T} \qquad (5.3)$$

Onde T é a soma de T1 e T2. Substituindo as equações 5.1 e 5.2 em 5.3, pode ser deduzido que a tensão de saída assume a seguinte forma:

$$V_{out} = \frac{XY}{K} \qquad (5.4)$$

A partir dos dados extraídos do texto citado anteriormente foram estipulados os valores utilizados no simulador de circuito, ilustrados pela figura a seguir (figura 5.4).

K=12V; E=2V;R=125KΩ
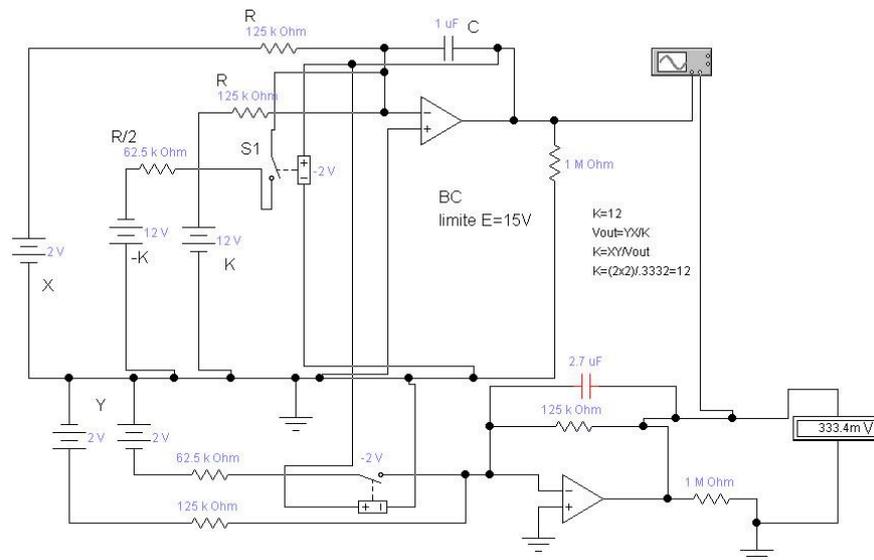
**Figura 5.5 – Circuito multiplicador**
Fonte: (Autoria própria)

Com esses valores se obteve os sinais indicados pelo osciloscópio virtual ilustrados a seguir (figura 5.6).
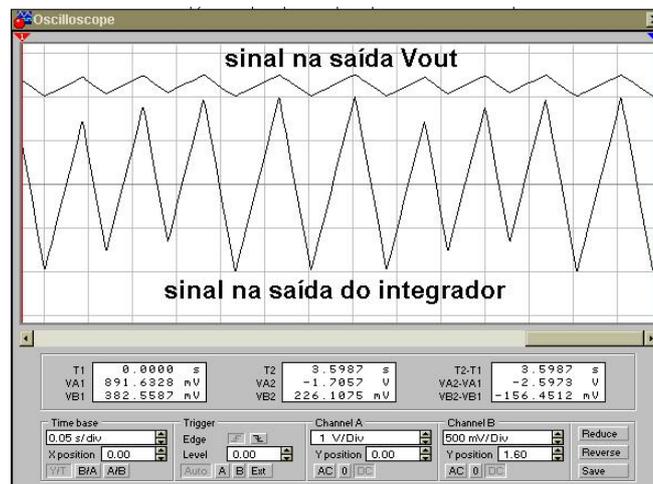
**Figura 5.6 – Sinais indicados pelo osciloscópio virtual**
Fonte: (Autoria própria)

Essas formas de sinais são encontradas em muitos dos trabalhos sobre esse tipo de circuito multiplicador pesquisados. O valor da tensão média encontrada na saída do circuito simulado de 333mV corresponde ao produto da tensão Y=2V pela tensão X=2V dividida pela tensão K=12, o que confirma a fórmula apontada. Repetindo a operação para outros valores de X e Y a relação matemática se mantém válida. Nessa configuração o circuito opera em corrente contínua e com pequenas alterações pode operar em corrente alternada, conforme se observa a seguir.

A variação do circuito multiplicador empregado pelo fabricante de instrumentos "Yokogawa Electric Limited" pode lidar com dois sinais alternados, ao invés de duas tensões contínuas.

O circuito integrador I pode trabalhar com o sinal alternado $E_X$, porém o sinal $E_Y$ é fornecido por uma fonte simétrica com valor positivo e negativo ao circuito multiplicador, conforme se pode observar na figura 5.5.

Ao introduzir dois amplificadores inversores com ganho unitário, em cascata na entrada $E_Y$ se obtém dois sinais simétricos e opostos que podem ser utilizados pelo circuito multiplicador. Esses amplificadores estão representados por $A_2$ e $A_3$ na figura 5.7.
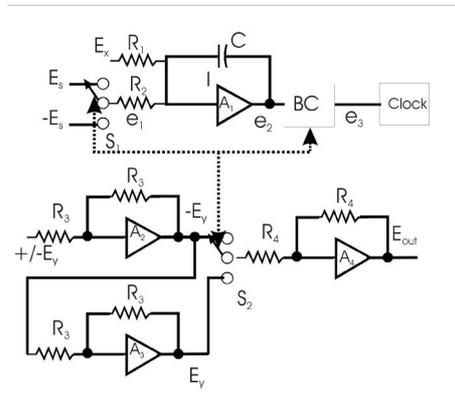
**Figura 5.7 - Circuito multiplicador YEW**
Fonte: (YEW)

O circuito multiplicador (Time Division Multiplier) ilustrado na figura 5.7 é baseado no conceito que a área de um pulso elétrico é igual ao produto de sua duração (base) pela amplitude (altura). Um circuito comparador compara a saída de tensão $e_2$ do integrador à soma do sinal de entrada $E_x$ com a tensão padronizada $E_s$ é integrada (com uma onda dente de serra de 200kHz aproximadamente no modelo 2885, 60kHz no modelo 2503, 100kHz no modelo 2504). Isto controla a proporção da abertura para o fechamento da chave $S_1$ de tal forma que a soma do valor do sinal de entrada $E_x$ e o valor médio da componente unidirecional para uma onda quadrada de amplitude $E_s$, a qual é determinada pela chave $S_1$, é zero. Conseqüentemente, se o tempo durante o qual a chave $S_1$ está conectada a $-E_s$ é expresso por $T_1$ e quando ligada a $E_s$ é $T_2$, a fórmula seguinte determina, um sinal de controle da chave cuja largura de pulso é exatamente proporcional à entrada $E_x$ é produzida:

$$\frac{E_x}{R_1} + \frac{E_s}{R_2}\left[\frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2}\right] = 0 \qquad (5.5)$$

O outro sinal de entrada $E_y$ é comutado pela chave $S_2$, intertravada com $S_1$, dando uma saída média:

$$E_{out} = E_y \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \qquad (5.6)$$

Desse modo, a forma de onda da saída tem largura de pulso proporcional ao sinal de entrada $E_x$, e altura proporcional ao sinal de entrada $E_y$. Se $(T_1\text{-}T_2)$ / $(T_1\text{+}T_2)$ for eliminada das equações 5.5 e 5.6 por meio da substituição.

$$E_{out} = -\frac{R_2}{R_1}\frac{E_x * E_y}{E_s} \qquad (5.7)$$

Como conseqüência, uma saída proporcional ao produto de $E_x$ por $E_y$ é obtida e esse circuito tem a capacidade de operar com sinais alternados em $E_x$ e $E_y$.

A partir dessas informações modificamos a configuração do modelo no simulador para verificar a operação desse tipo de circuito com sinais alternados, conforme ilustra a figura a seguir (figura 5.7).
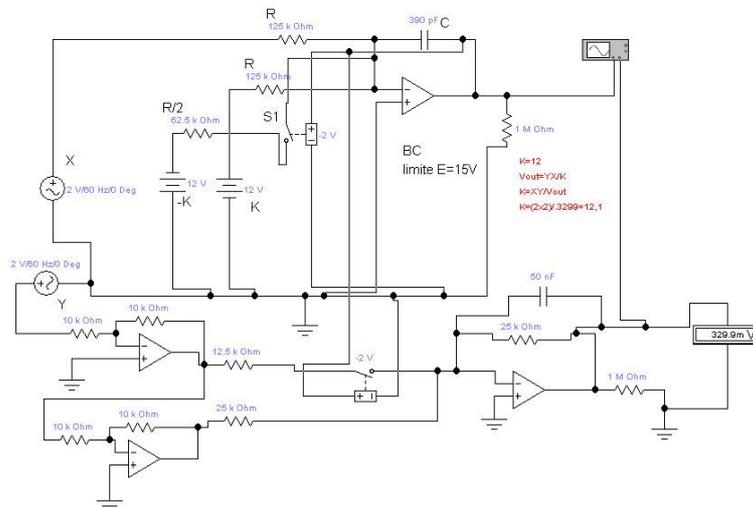
**Figura 5.8 - Circuito multiplicador YEW para simulação**
Fonte: (Autoria própria)

Com modelo se obteve os sinais indicados pelo osciloscópio virtual ilustrados a seguir.
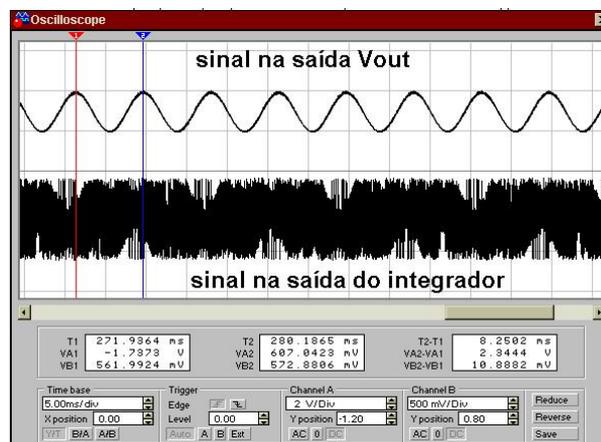
**Figura 5.9 – Sinais indicados pelo osciloscópio virtual**
Fonte: (Autoria própria)

O sinal da saída corresponde ao produto dos sinais da entrada dividido por 12 que corresponde ao fator K, respeitando a expressão $V_{out}$ = XY/K. O valor médio corresponde a aproximadamente 320 mV, muito próximo dos 333 mV teóricos e o circuito responde adequadamente quando as senóides envolvidas estão defasadas.
O sinal da saída do integrador é triangular de freqüência muito superior ao sinal da saída $V_{out}$, cuja freqüência corresponde a duas vezes a freqüência dos sinais de entrada, neste último caso 120 Hz.
Nesta etapa de saída o sinal obtido corresponde é uma representação analógica da curva de potência instantânea. Para o instrumento pesquisado existe uma etapa de conversão de analógico para digital que utiliza um método denominado "Feedback Pulse Width Modulating Counting". Não obstante se utilizarmos um instrumento com capacidade de medir valor médio, o que é bastante comum, podemos obter dessa leitura o valor da potência ativa.

## 5.2. A medição de energia

A medida da potência elétrica indica a taxa de consumo de energia (com relação ao tempo) sendo um parâmetro de controle importante na operação elétrica do sistema de potência. Entretanto, no aspecto do custo de fornecimento do insumo o parâmetro mais importante é o consumo de energia.
Os instrumentos que medem o consumo devem operar pelos mesmos princípios dos wattímetros, posto que o cálculo da energia é função da potência ativa e do período de medição, o que significa de modo bem grosseiro incorporar um mecanismo do tipo relógio ao medidor de potência.

### 5.2.1. O medidor eletromecânico (por indução)

Para determinar a quantidade de energia elétrica recebida pelos consumidores ou produzida por centrais elétricas, pode se utilizam medidores eletromecânicos de energia elétrica. A diferença básica entre os mecanismos de medição dos medidores de energia e dos aparelhos de ponteiros (wattímetros), consiste em que nos primeiros a parte faz rotações completas que são transferidas a um mecanismo contador formado por engrenagens e elementos numerados. A influência da potência da carga se manifesta pela velocidade de rotação. Devido as suas propriedades as instalações de corrente alternada podem utilizar os medidores de indução, que são simples e robustos. Nestes

aparelhos os fluxos produzidos por duas bobinas fixas atravessam um disco de alumínio instalado no eixo que transmite o movimento para o mecanismo. Essas bobinas estão dispostas de tal forma que constituem um pequeno motor bifásico de indução que produz um campo girante quando alimentado por fasores (tensão e corrente) sem defasagem elétrica. Essa configuração permite ao medidor deduzir os efeitos da potência reativa para efeito de contagem da energia.

Em se tratando de um motor de indução bifásico, para que se produza um campo girante é necessário que haja a defasagem entre os fluxos magnéticos das bobinas. Para obter esse efeito o número de espiras das bobinas de tensão e corrente é configurado como se segue.

O enrolamento de uma das bobinas do medidor tem muitas espiras e por isso tem uma grande indutância. Esse enrolamento é acoplado da mesma forma que um voltímetro e fica submetido à tensão aplicada na carga. O outro enrolamento tem um número pequeno de espiras e baixa indutância. Esse enrolamento está ligado no circuito em série, da mesma forma que um amperímetro, sendo seu fluxo proporcional à corrente na carga. Devido às diferentes indutâncias entre as bobinas de corrente e de tensão os fluxos produzidos são defasados de aproximadamente 90 graus, o que cria uma configuração bifásica.Por isso, somente quando a carga a ser medida é resistiva, ou seja, não há defasagem entre a corrente e a tensão é que se aproveita essa configuração para produzir o maior momento.

Os fluxos alternos induzem no disco corrente, cuja interação com o campo girante das bobinas cria o momento de rotação ($M_{ROT}$).

Dessa forma, um fluxo magnético do medidor é proporcional à tensão ($U$) e outro a corrente ($I$) e o momento de rotação ($M_{ROT}$) resultante que surge devido à influência desses dois fluxos é proporcional à potência da corrente alternada. Além disso, como o campo girante produzido depende do ângulo de fase dos fluxos nas bobinas, o fator de potência influencia na rotação.

Quando o fator de potência da carga é um, o fluxo criado pela bobina de tensão, cuja indutância é elevada, está atrasado de aproximadamente 90 graus em relação ao fluxo criado pela bobina de corrente e assim o torque é máximo. Por outro lado se o fator de potência da carga é zero, o fluxo criado pela bobina de corrente entra em fase com o da bobina de tensão e o torque é mínimo.

Em qualquer outro fator de potência a corrente pode ser decomposta em duas componentes proporcionais ao seno e ao co-seno do ângulo de fase entre a tensão e a

corrente. A componente correspondente ao seno produz um fluxo em fase com o fluxo da bobina de tensão e por isso não produz torque. Por isso o torque desenvolvido é somente proporcional a potência ativa da carga, nesse tipo de medidor, o que implica na expressão 5.8.

$$M_{ROT} = K_{ROT} * U * I * \cos(f) \quad (5.8)$$

$$M_{ROT} = K_{ROT} * P \quad (5.9)$$

"Mas para que o número de rotações do contador seja proporcional à energia que passa pelo seu mecanismo, é preciso contrapor ao momento de rotação o momento de travagem ($M_{TR}$), que é proporcional à velocidade de rotação da parte móvel, isto é, o disco do contador" (28).

Este momento aparece devido à ação do campo de um ímã permanente sobre o disco do contador. No processo de rotação o disco atravessa o campo do ímã permanente, o que induz nele uma força eletromotriz ($e_d$). A força eletromotriz é diretamente proporcional à indução magnética (B), à velocidade periférica (v) e ao comprimento (l) do ímã, como expresso pela equação 5.10. A indução magnética é diretamente proporcional ao fluxo do ímã permanente e inversamente proporcional à área do imã paralela à superfície do disco, indicada na equação 5.11. O disco gira com velocidade periférica proporcional à distância (R) do eixo de rotação de acordo com a equação 5.12. A partir da combinação desses elementos resulta a equação 5.13 (28).

A força eletromotriz ($e_d$) provoca no disco uma corrente ($i_d$) inversamente proporcional á resistividade do alumínio de que é feito do disco, indicado nas equações 5.14 a 5.16. A força de interação entre a corrente induzida e o fluxo do ímã produz um momento de travagem proporcional à distância do ímã ao eixo de rotação. As relações entre esses elementos fiscos podem ser deduzidas matematicamente por:

$$e_d = B * l * v \quad (5.10)$$

$$B = \frac{f}{S} \quad (5.11)$$

$$v = \frac{2 * p * R * n}{60} \quad (5.12)$$

$$e = \frac{2*p*f*l*R*n}{60*S} \qquad (5.13)$$

$$i_d = \frac{e_d}{R_d} \qquad R_d = \frac{r_{Al}*l_{eq}}{S_{eq}} \qquad i_d = \frac{e_d*S_{eq}}{r_{AL}*l_{eq}} \qquad (5.14 \text{ a } 5.16)$$

$$i_d = \frac{2*p*f*l*R*n*S_{eq}}{60*S*r_{Al}*l_{eq}} \qquad (5.17)$$

$$F = B*i_d*l \qquad (5.18)$$

$$M_{TR} = R*F$$
$$M_{TR} = R*B*i_d*l$$
$$M_{TR} = \frac{R*f*i_d*l}{S} \qquad (5.19 \text{ a } 5.21)$$

$$M_{TR} = \frac{2*p*f^2*l^2*R^2*n*S_{eq}}{60*S^2*r_{Al}*l_{eq}} \qquad (5.22)$$

$$K_{TR} = \frac{2*p*f^2*l^2*R^2*S_{eq}}{60*S^2*r_{Al}*l_{eq}} \qquad (5.23)$$

$$M_{TR} = K_{TR}*n \qquad (5.24)$$

Na condição de equilíbrio o momento de rotação é igual ao momento de travagem de modo que o disco gira com velocidade constante proporcional à potência da carga.
Um mecanismo de contagem é acoplado ao eixo do disco para contar a quantidade de energia. As relações de transmissão das engrenagens são calculadas em função dos parâmetros elétricos e físicos do medidor. O deslocamento do ímã permanente permite realizar pequenos ajustes no medidor.
“Nos dispositivos de corrente trifásica se utilizam contadores apropriados, que constituem dois ou três elementos móveis dos contadores de indução que exercem influência através de um eixo comum sobre o mecanismo de contagem comum. Nos sistemas trifásicos de três fios para os contadores se utiliza os circuito correspondente

ao método de dois wattímetros e nos sistemas de quatro fios, o circuito que corresponde ao método dos três wattímetros" (28).

Esse tipo de medidor opera satisfatoriamente em sistemas com corrente alternada, com forma de onda senoidal que alimenta cargas lineares. Tais cargas não variam com a amplitude da tensão a elas aplicada e não provocam deformação na forma de onda presente no sistema.

Em um passado relativamente recente se menosprezava o efeito das cargas com baixo fator de potência, devido em parte aos medidores difundidos nas instalações. Por outro lado se considerava que essas cargas não apresentavam efeito significativo para o custo operacional que justificasse o uso de tecnologia mais cara para sua determinação. Nesse caso se encontram o efeito de motores com baixo carregamento mecânico, transformadores operando próximo da condição de vazio, reator convencional de luminária para lâmpada fluorescente, cujo efeito reativo final é pequeno se comparado ao trabalho útil proporcionado pela potência ativa nesses equipamentos, tendo em vista o custo do equipamento destinado a medi-lo.

Devido à evolução da demanda por energia associada ao processo de privatização das concessionárias, valores antes desprezados passaram a ser significativos visando otimizar os recursos e postergar investimentos.

Além disso, com o aumento da demanda por aparelhos eletrônicos houve uma ampliação da influência de cargas não lineares no sistema elétrico, cujo efeito final é a diminuição do fator de potência, conforme discutido no capítulo 4.

Essas condições resultam em um ônus para a empresa distribuidora de energia e por isso o consumidor pode ser taxado. Para taxar esse ônus a concessionária precisa medir o montante que ele representa.

Atualmente os grandes consumidores industriais e comerciais são taxados quando o fator de potência de suas instalações é baixo, conforme a legislação vigente. Para esses consumidores foram instalados instrumentos eletrônicos com capacidade para medir outros parâmetros além da potência ou energia ativa.

Os consumidores residenciais são taxados através da medição obtida por medidores de energia por indução, que só mede potência ativa e ainda podem ser influenciados pelos efeitos de cargas não lineares. Esse método de medição é viável se o efeito das cargas com baixo fator de potência e não lineares não justifica a troca do medidor.

Os medidores de energia elétrica de indução são dispositivos robustos, baratos e estão instalados na grande maioria dos consumidores.

Como os medidores do tipo indução somente registram a energia ativa, a empresa distribuidora de energia em princípio não pode cobrar pelo excedente reativo, a não ser que troque o medidor ou adote o procedimento de medição temporário definido pela resolução 456 da ANEEL, e assim passar a cobrar o excedente reativo.

A dissertação de mestrado com título "Interferência de harmônicos em equipamentos de medição de energia elétrica" por José Eduardo Rodrigues, apresentam resultados interessantes desse tipo de avaliação.

Tabela 5.1 – Condições das ondas de tensão e corrente dos ensaios e erros apresentados pelo medidor monofásico-tipo indução

| Grandeza | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 4 | Ensaio 5 | Ensaio 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tensão [V] | 119,80 | 120,6 | 111,2 | 120,3 | 120,2 | 98,2 |
| DHTu [%] | 1,09 | 1,12 | 10,92 | 11,34 | 1,12 | 25,62 |
| Corrente [A] | 15,003 | 1,5535 | 15,354 | 1,5692 | 1,4884 | 5,1492 |
| DHTi [%] | 54,86 | 60,76 | 54,37 | 62,37 | 61,69 | 56,33 |
| Defasagem na fundamental | -2,4° | +1,8° | -17,7° | -14,6° | -57,0° | -69,4° |
| Potência do padrão [W] | 1569,8 | 158,75 | 1473,3 | 160,98 | 84,60 | 160,98 |
| Erro do medidor [%] | -0,56 | +1,67 | -3,48 | -2,58 | -8,52 | -18,3 |

Fonte: CED322/QUEN 004 (III) / RL 001/OR - 2000.

Os valores foram aplicados a um medidor eletromecânico monofásico, uma fase, dois fios, classe dois, faixa de tensão nominal de rede 110 a 127V, freqüência 60 Hz, faixa de corrente de 0,75 a 60 A, corrente nominal 7,5 A, corrente de partida 0,3 A, constante do registrador 1,0 Ah/unidade, constante de aferição 0,01 Ah/pulso, número de elementos: 1; classe de exatidão 0,5%.

As conclusões apontadas pelo trabalho (37) para esses dados indicavam que um medidor de energia de indução pode apresentar elevado erro instrumental quando submetido a condições harmônicas. Quando somente a corrente era distorcida, associada a pequenos ângulos de defasagem em relação à tensão os erros eram toleráveis e compatíveis com a classe de exatidão do medidor. Porém, a deformação do sinal de tensão e/ou ângulos de defasagem elevados podem conduzir a erros intoleráveis.

Isso indica que o medidor que opera por indução apresenta dificuldade em indicar a potência ativa que se dispersa pelo espectro de freqüências que ocorre quando a onda de tensão também se deforma. Além disso, se o ângulo de defasagem da fundamental é elevado, associado à deformação da tensão, pode significar que uma parte considerável da potência se dispersa nessas harmônicas. Também se observa que nesses casos o valor indicado no medidor de indução é sempre menor que o do padrão.

Entretanto se espera que em uma instalação bem dimensionada não ocorra grande distorção no sinal de tensão e que as potências de cargas residenciais sejam mais modestas de modo que os ensaios nessas condições são mais interessantes para esse trabalho.

Com a finalidade de compreender melhor e à luz do trabalho precedente foram executadas algumas experiências com um medidor de indução, um medidor eletrônico e cargas normalmente encontradas nas instalações elétricas, conforme descrição a seguir.

Esse tipo de configuração de carga é tipicamente associado a aparelhos eletrônicos que possuem fontes formadas por retificadores e filtros em configuração similar a da figura a seguir.

Ensaio 1: Lâmpada incandescente com potência nominal 60W e tensão nominal 127V.

Ensaio 2: Retificador de meia onda alimentando lâmpada incandescente de potência nominal 60W e tensão nominal 127V.

Ensaio 3: Retificador de meia onda alimentando lâmpada incandescente de potência nominal 60W e tensão nominal 127V ligada em paralelo a um capacitor de 500uF.

Ensaio 4: Lâmpada fluorescente compacta de potência nominal 11W e tensão nominal 127V. Neste ensaio existe a dificuldade de medição, pois a corrente é muito baixa face à sensibilidade projetada para esse tipo de medidor, o que pode ser uma significativa fonte de erro.

Ensaio 5: Retificador de meia onda alimentando lâmpada incandescente de potência nominal 60W e tensão nominal 220V ligada em paralelo a um capacitor de 500uF.

Tabela 5.2 - Dados obtidos em função dos arranjos de circuito:

| Grandeza | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 4 | Ensaio 5 | Calculado |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tensão [V] | 113 | 127,5 | 71,71 | 111,5 | 110 | 127,5 |
| DHTu [%] | 2,5 | 2,4 | 6,4 | 2,3 | 3,6 | 2,4 |
| Corrente [A] | 0,446 | 0,3 | 0,770 | 0,127 | 0,584 | 0,353 |
| DHTi [%] | 2,5 | 42,4 | 121,9 | 114,7 | 155,3 | * |
| Potência ativa no padrão [W] | 50 | 35 | 32 | 9 | 33 | 31,86 |
| Potência reativa no padrão [VAr] | 2 | 14 | 44 | 10 | 55 | 31,78 |
| Potência aparente no padrão [VAr] | 50 | 38 | 55 | 14 | 64 | 45 |
| Fator de potência | 0,998 ind. | 0,919 | 0,592 ind | 0,674 ind | 0,512 ind | 0,71 |
| Potência estimada pelo medidor de indução [W] | 48,13 | 34,14 | 28,05 | 4,06 | 28,74 | 34,14 |
| Erro do medidor [%] | -3,74 | -2,46 | -12,34 | -54,89 | -12,91 | 7,15 |

Fonte: (Autoria própria)

Alguns fatos observados merecem alguma ponderação. O ensaio 1 corresponde à condição teoricamente mais favorável ao medidor com uma carga resistiva formada pela lâmpada incandescente, sendo, portanto a configuração de referência.

O ensaio 2 foi realizado com um elemento resistivo e um diodo na configuração de retificador de meia onda, similar àquela estudada no capítulo 4. Nesta configuração se espera que o circuito apresente um fator de potência igual a 0,71 ou próximo segundo os cálculos teóricos do capítulo 4. Neste caso se observou que tanto o medidor de indução quanto o padrão indicaram valores próximos na potência ativa e o padrão indicou ainda fator de potência 0,92.

Esse desvio substancial do valor esperado levou ao estudo da configuração do padrão utilizado nas medidas. O padrão é formado por um medidor eletrônico do tipo encontrado em painel cuja entrada de tensão foi conectada em paralelo à carga medida e

a entrada de corrente foi ligada ao secundário de um transformador somente para efeito de isolação.

O transformador de corrente utilizado opera através da indução a partir de um circuito primário para um circuito secundário através da variação do fluxo magnético produzido pelo primeiro. Dessa forma se a grandeza que produz o fluxo é uma corrente contínua, não haverá transferência de sinal, de modo que haverá uma perda de informação se houver uma componente desse tipo envolvida.

A forma de onda de corrente obtida de um circuito retificador de meia onda possui essa componente contínua.

Nem todos os dados obtidos nesta medição foram perdidos e através de algumas considerações, cálculos e análises é possível extrair conclusões interessantes.

O primeiro circuito formado pela lâmpada incandescente é o elemento comum dos ensaios 1 e 2. Através do cálculo do valor de sua resistência temos um valor para ser usado como base, além disso, sabemos o valor da tensão da fonte e o tipo de circuito de modo que utilizando as expressões encontradas no capítulo 4 se pode calcular os valores da última coluna da tabela 5.2.

Embora tenha havido um problema inicial ainda se pode extrair informações valiosas dos dados obtidos. A primeira e mais simples é que ao medir valores relativamente baixos de potência com correntes baixas os instrumentos operam em uma faixa mito desfavorável no início da escala e por isso erros mais elevados não são totalmente estranhos.

A segunda informação é que a potência ativa, embora diferente do valor calculado não é tão incoerente com o que se pode esperar de uma avaliação aproximada por cálculo e como o valor do medidor de indução é próximo do padrão se deduz que apresentam comportamento similar no ensaio 2. É razoável propor que se aceite a potência ativa medida nesse ensaio com base na premissa de que esse valor é influenciado pelo produto da harmônica fundamental pela tensão, desde que esta última não se deforme, conforme estabelecido no capítulo 4. A distorção harmônica total apurada para essa onda é 2,4%, o que assegura uma boa aproximação.

Como a perda de informação, ou de sinal corresponde a componente contínua, que em princípio não participa do cálculo da potência ativa o problema é no mínimo atenuado.

Essa perda de sinal provoca um deslocamento do sinal percebido pelo medidor, conforme se observa na figura a seguir.
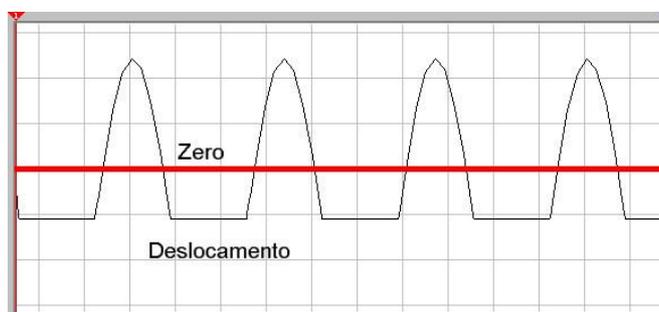
**Figura 5.10 – Sinal estimado para a saída do transformador de corrente.**
Fonte: (Autoria própria)

Decompondo o sinal o sinal de corrente original obtemos os seguintes valores distribuídos no espectro de freqüências segundo a tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Distribuição da corrente no espectro de freqüências

| CC | 60Hz | 120Hz | 180Hz | 240Hz | 300Hz | 360Hz | 420Hz | 480Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 224mA | 353mA | 151mA | - | 30mA | - | 13mA | - | 7mA |

Fonte: (Autoria própria)

Se o valor da potência ativa não é afetado significativamente, o valor do fator de potência por outro lado é tal que significaria não cobrar multa pelo valor indicado pelo padrão.

Isso indica que talvez haja algum problema no algoritmo que calcula a potência reativa e aparente.Por exemplo, segundo a resolução n° 456 da ANEEL, o fator de potência é definido como a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétrica ativa e reativa, consumidas num mesmo período especificado de uma hora.

Supondo que a expressão utilizada no algoritmo do padrão está embasada nessa premissa, é possível deduzir uma expressão para o cálculo do fator de potência FP a partir da potência ativa P e da reativa Q.

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \qquad (5.25)$$

Utilizando os dados do padrão para potência ativa (35W) e reativa (14VAr) se obtém o fator de potência igual a 0,92. O valor da potência reativa é o que está substancialmente diferente do calculado teoricamente. Por outro lado o fabricante do equipamento não especifica em seu manual os métodos de cálculo o que dificulta a avaliação técnica mais apurada.

Por outro lado à falta da componente contínua não afeta o cálculo da distorção harmônica total, conforme se observa na expressão 4.84 ou 4.85, mas afeta o cálculo do fator de potência conforme se observa na expressão 4.87. Para ondas simétricas esse parâmetro é desprezado, o que leva à expressão 4.88. Se essa última é utilizada no algoritmo do instrumento, haverá um erro associado.

A corrente no ensaio 4 da lâmpada fluorescente compacta, embora bastante distorcida, conforme se pode observar na figura 4.14, é simétrica. Isso elimina qualquer dúvida que porventura houvesse nos valores obtidos do padrão. Neste caso se observa um grande erro de indicação do medidor de indução, porém isso provavelmente se deve mais ao baixo valor de corrente do que a distorção propriamente dita, embora isso deve contribuir.

Os ensaios 3 e 5 são similares, pois utilizam a mesma configuração básica de retificador de meia onda e lâmpada, porém com um capacitor de 500 uF em paralelo com essa última. Isso aumenta a distorção da onda de corrente, pois diminui o tempo de condução a um pequeno intervalo próximo ao pico de tensão. Nestes casos se observa uma diferença significativa entre o medidor de indução e o padrão e um aumento com relação aos ensaios 1 e 2. Esse aumento entre os ensaios pode se explicar pelo fato de que embora a distorção de tensão seja pequena, ela não é nula de modo que se a distorção da corrente aumenta haverá um aumento da contribuição das harmônicas diferentes da fundamental.

Isso é coerente com a afirmação de que um medidor de energia do tipo que opera por indução pode apresentar elevado erro instrumental quando submetido a condições harmônicas (37).

### 5.2.2. Os medidores inteligentes “smart meters”

Dentro do universo dos medidores eletrônicos existe uma categoria que incorpora funções de aquisição, análise e comunicação de dados. A esse grupo de medidores se atribui a designação de medidores inteligentes ou “smart meters” em inglês.

Seu princípio de funcionamento se assemelha muito ao medidor de potência eletrônico já citado neste capítulo, porém agregam funções para comunicação de dados em massa, úteis aos sistemas de gerenciamento integrado.

Em se tratando de uma tecnologia que substitui uma outra já consolidada, a confiança nos medidores eletrônicos deve ser assegurada através da garantia de que eles conseguem ao menos medir com desempenho similar aos eletromecânicos tradicionais.

A avaliação de desempenho do medidor eletrônico comparado ao medidor eletromecânico tradicional é um assunto de interesse para as concessionárias sendo objeto de estudos. No estudo sobre a interferência de harmônicas em equipamentos de medição de energia elétrica (37), foram realizados ensaios nas condições normalizadas e com ondas distorcidas.

Trata-se de uma comparação de duas tecnologias para verificar o desempenho frente a condições normalizadas e com distorções nas formas de onda acima do normalizado.

No caso dos medidores eletromecânicos, que é a tecnologia de referência foi observado o seguinte comportamento.

Nas condições normalizadas os medidores apresentaram desempenho satisfatório, como esperado. Quando submetidos à tensão praticamente senoidal e corrente distorcida os medidores eletromecânicos apresentam erro satisfatório. Desde que a harmônica fundamental de corrente tivesse uma pequena defasagem. Caso essa defasagem fosse substancial (da ordem de 60°, por exemplo) o erro supera o limite de exatidão desse medidor que é da ordem de 2%.

Quando a distorção afeta as ondas de corrente e tensão, o erro do medidor é elevado, superando o admissível segundo sua classe de exatidão.

Com isso se espera que o medidor eletromecânico consiga medir a energia ativa de modo aceitável, desde que a tensão da rede não seja deturpada e mesmo que a corrente drenada pela carga seja distorcida, respeitando a condição de pequena defasagem da harmônica fundamental. Esse tipo de condição é o usual nas instalações elétricas atuais, sendo justificada pelo fato desses medidores não serem considerados como inadequados pelas concessionárias a ponto de exigir sua substituição imediata. Ou seja, esses medidores de modo geral são aceitáveis para medir energia ativa, mesmo no cenário atual com cargas não lineares.

Os medidores eletrônicos precisam no mínimo igualar esse desempenho para poder desafiar a supremacia dos medidores instalados.

Conforme indicado neste capítulo a tecnologia de medidores de potência e energia digitais pode alcançar resultados melhores do que os medidores eletromecânicos ao lidar com sinais distorcidos.

Entretanto isso somente pode ser alcançado com circuitos mais apurados e, portanto mais caros, cuja aplicação fora dos laboratórios pode não ser justificada financeiramente.

O avanço da tecnologia trouxe a possibilidade de construir dispositivos de medição mais sofisticados a um custo menor, baseado em tecnologia de micro-controladores, por exemplo.Esses dispositivos trabalham na base de algoritmos que desempenham as funções de medição e a sua implementação pode envolver a simulação do comportamento de um instrumento existente ou o cálculo a partir das expressões definidas pela teoria, mas certamente o grau de complexidade é proporcional ao custo envolvido.

Simular o comportamento de instrumentos existentes pode implicar em simplificação do processo e barateamento de custos, ao passo que a aplicação da definição teórica pode implicar em maiores exigências de digitalizadores de sinal e custos maiores.

Isso tudo se reduz à definição de um modelo de medidor que seja adequado tecnicamente e viável economicamente e embora seja possível obter um medidor eletrônico de energia de qualidade superior ao tradicional, na prática a restrição econômica dificulta sua disseminação.

Dessa forma existem medidores eletrônicos que apresentam desempenho no mínimo similar aos eletromecânicos que eles substituem e incorporam a medição da energia reativa, por exemplo.

Os modelos analisados (37) apresentam características que possibilitam operar nas redes modernas, tais como a saída de dados e a medição por meios eletrônicos, etc. Os maiores erros apurados para esses medidores eram de aproximadamente 2,5% e embora sejam similares aos dos medidores eletromecânicos estão acima do nominal que é 1%.

Em resumo, todos os medidores analisados (eletrônicos ou eletromecânicos) mostraram resultados razoáveis para a medição da potência e da energia ativa na condição de que ao menos a tensão da rede não seja muito deturpada, o que é compatível com a maioria das instalações. A tendência é que o erro seja maior quando a corrente que percorre o medidor é baixa, sendo que os medidores eletrônicos são mais sensíveis e, portanto lidam melhor com essa condição.

Os medidores eletrônicos analisados utilizavam algum tipo de transformador de corrente no circuito de medição o que comprometeu a medição do fator de potência de uma carga simples formada por um diodo e uma resistência. O valor medido de 0,92 é maior que o esperado 0,71 para esse tipo de carga.

A hipótese para explicar uma medição razoável de potência ativa e uma medição ruim de fator de potência é que a componente contínua do sinal foi eliminada do valor eficaz do medidor.

Dessa forma a potência aparente resultou menor e como a potência ativa se manteve em um patamar compatível com o esperado para o circuito, o fator de potência medido foi mais alto do que deveria. O medidor de indução acompanhou a mesma tendência, o que é esperado de um medidor que trabalha movido pelo campo girante produzido pelas bobinas de tensão e corrente alimentada por corrente alternada.

O fluxo produzido pela componente contínua ao interagir com o produzido pela tensão alternada não produz campo girante e com isso o mecanismo não responde a esse sinal.

O conhecimento da tecnologia de medição não fornece todas as respostas na elaboração de um sistema automático para o gerenciamento da energia, mas fornece subsídios para o dimensionamento de sistemas que sejam confiáveis para essa tarefa. Além disso, permite avaliar se a medição é efetuada corretamente, evitando desperdícios decorrentes dos erros.

Tecnicamente tais conclusões são razoáveis para uma tecnologia que está sendo transferida de um ambiente controlado para a aplicação generalizada em campo e sobre a qual se depositam demasiadas esperanças. É razoável supor que em condições de laboratório se consiga medir todas as grandezas com precisão e ao se transferir essa tecnologia para medição em campo e em larga escala pode haver perdas até por conta do custo dos equipamentos envolvidos. Neste caso o problema se encontra na definição do valor do erro aceitável.

A partir da resolução dos problemas básicos, os medidores inteligentes podem desempenhar um conjunto de funções avançadas, além da medição dos parâmetros de potência e energia, tais como, leitura e comunicação automáticas, localização remota de perda de dispositivo da rede, auxiliar a alocação de cargas segundo critérios tarifário sazonal, auxiliar na estimativa de vida útil de equipamentos como transformadores de distribuição em função da carga a que foram submetidos, etc.

Uma infra-estrutura avançada de medição oferece a possibilidade para serviços energéticos relacionados, tais como o gerenciamento pelo lado da demanda e a realização das usinas elétricas virtuais.

Depositа-se o futuro da medição inteligente fortemente nas políticas e decisões dos governos envolvidos. Economia de energia e aumento da segurança do suprimento serão

os principais impulsionadores da rede inteligente como meio de atingir esses indispensáveis objetivos (40).

A medição inteligente envolve a instalação do medidor inteligente na residência e a leitura regular, processamento e realimentação dos dados de consumo para o consumidor. Um medidor inteligente deve ter as seguintes capacidades:

- O registro em tempo real ou o mais próximo disso do uso da eletricidade e possível geração local (por exemplo, no caso de células solares);
- Oferecer a capacidade de leitura local e remota (sob demanda);
- Limitar a energia que passa pelo medidor (em casos extremos cortar a eletricidade do consumidor);
- Interconexão com redes e dispositivos (por exemplo, geração distribuída);
- Capacidade de se integrar com outros medidores de outras redes (por exemplo, gás, água).

Partindo da premissa que tecnologicamente não há obstáculos para a introdução do medidor inteligente se acrescenta o argumento de que ele é o sucessor lógico do modelo eletromecânico, tal como o toca-disco, o telefone e a máquina de escrever foram substituídos por alternativas mais inteligentes (40).

O interesse pelos medidores inteligentes no exterior é motivado pela necessidade de maximizar a eficiência energética em função de suas fontes primárias de energia. No Brasil, onde ainda existe predominância do uso do potencial hidráulico, o interesse maior é pela capacidade de monitorar (policiar) o sistema, associado às perdas de receita.

“Não existe nada implantado no Brasil que utilize o conceito de Smart Grids. O que existe é Smart Metering, ou seja, a medição eletrônica avançada”, conforme explicação do presidente da Associação de Empresas Proprietárias de Infra-Estrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações (Aptel), Pedro Jatobá para a revista GTD em 2008 (41).

Nos consumidores do grupo A (alta tensão) a medição digital com telemetria já existe, pois as perdas comerciais podem ser muito altas o que viabiliza a telemetria.

Segundo dados da Companhia Energética de Brasília (CEB), fornecidos a revista gtd pelo gerente de medição e fiscalização Vagner Camilo Fernandes em 2008, o grupo A era responsável por 40% do faturamento da empresa. O uso da telemetria começou em 2007 e em 2008 haviam 400 medidores monitorados, havendo a previsão para anexar outros 1475 (41).

No caso dos medidores de média e baixa tensão, as concessionárias estavam iniciando os primeiros projetos piloto para aplicar a telemetria com objetivo de combater o furto de energia. Ainda em 2008 o superintendente de regulação e comercialização da Aneel, Ricardo Vidinich, destacou que são nas aplicações de combate ao furto de energia que os medidores eletrônicos com canal de comunicação têm se mostrado viável. Segundo ele, o uso de medidores eletrônicos chegou a reduzir as perdas com furto em 50%, em alguns casos da baixa tensão (41).

A Ampla reduziu as perdas totais com energia em baixa tensão em 4,73%, no período de dezembro de 2003 a agosto de 2008. Nessa época ela possuía 474 mil clientes, sendo 298 mil faturados eletronicamente.

Quando não se trata de combate ao furto de energia elétrica as aplicações da telemetria pouco ocorrem, pois não há retorno do investimento. O custo com a leitura manual dos medidores não justifica a implantação dos equipamentos com funções mais avançadas de comunicação (41).

O engenheiro de manutenção eletroeletrônica da CEMIG, Antônio César Araújo, deu um exemplo em 2008 que ajuda a entender a situação: no caso desta empresa mineira, o custo da leitura manual era de apenas R$0,40 por medidor (41). Mesmo que não se conheça exatamente o custo da infra-estrutura para a medição inteligente, sabe –se que ele não é nulo e depende de uma substancial rede tecnológica para ser mantido. Se por outro lado esse sistema fosse embutido em uma rede auto-sustentável de troca de informações, como a internet, usaria recursos mantidos por outros interessados, o que reduziria seu custo. No entanto, uma rede de domínio público como esta implicaria em custos com a segurança das informações.

Desta forma se conclui que no estado atual da arte nos sistemas de medição existem muitas alternativas confiáveis, desde que se considere o limite tecnológico para sua aplicação em função do ambiente onde será instalada. Sistemas tecnologicamente avançados e que agregam muitos recursos podem ser inviáveis em um cenário residencial mais humilde, pois a demanda de energia pode ser gerenciada de maneira mais simples por sistemas mais baratos.

### 5.2.3. Avaliação do cenário com medidores de indução, eletrônicos e medição do fator de potência.

As perdas intrínsecas dos medidores de indução podem ser obtidas dos dados dos fabricantes. Segundo dados de catálogo (38) elas estão em torno de 1,1W no circuito de potencial e em torno de 0,2W no circuito de corrente. Além disso, a corrente de partida é em torno de 0,5% da corrente nominal, de modo que há dificuldade em medir valores no começo da escala. Segundo dados da concessionária Eletropaulo (39) devido à sua sensibilidade, esse medidor somente mede acima dos 26,4W, o que ajuda a entender a preocupação com os aparelhos ligados em “stand-by”.

Essa tecnologia de medição, no entanto está consolidada em um vasto parque instalado, a vida útil é estimada em 25 anos é maior que os 15 estimados para o eletrônico, sendo menos sensível a variação de temperatura com possibilidade de reparo. Segundo dados da concessionária Eletropaulo existia em 2008 cinco e meio milhões de consumidores com esses medidores ligados na rede de baixa tensão, de modo que a substituição representa um ônus considerável em capital e tempo.

A resolução dos dados disponíveis varia em função do medidor disponível, por exemplo, a maioria dos medidores atualmente opera em um sistema que registra os dados em uma escala mensal. Os medidores eletrônicos podem fornecer dados em uma escala de minutos e, além disso, indicam outros parâmetros além do consumo de energia.

Um exemplo de aplicação pode elucidar o efeito desses medidores. Em uma instalação elétrica se registrou a variação da potência ao longo de uma semana com um medidor eletrônico e associado a isso se estimou a variação do fator de potência de acordo com o critério da resolução 456 da ANEEL. A figura 5.11 a seguir ilustra os resultados.

**Figura 5.11 – Medição de potência em uma instalação elétrica**
Fonte: (Autoria própria)

Os valores foram indicados em p.u. (por unidade) para facilitar a comparação no gráfico ao manter a mesma escala. O valor de base da potência corresponde ao maior valor registrado, ou seja, 9883W. A escala de tempo é de 1000 minutos por divisão e abrange um intervalo de aproximadamente 120 horas ou cinco dias, sendo feito um registro a cada dez minutos.

O gráfico abrange um período de cinco dias e mostra um perfil recorrente de consumo, exibindo picos e vales bem definidos, o que sugere um aproveitamento energético baixo da capacidade da instalação. Dessa forma existe a possibilidade de ampliar substancialmente a carga instalada, desde que exista um sistema para coordenar a sua inserção no sistema de modo a evitar picos excessivos de demanda.

Para isso é necessário fazer o levantamento das cargas (equipamentos) relacionando seu uso ao tempo. Em função disso se pode otimizar o uso das cargas, o que envolve o planejamento integrado de recursos. Esse tipo de análise envolve as variáveis relacionadas ao ambiente da instalação e sua demanda, e apresenta um comportamento dinâmico em função do tempo com variações sazonais durante o ano. A possibilidade de armazenar energia e fontes externas que possam influenciar a instalação elétrica também deve ser levada em conta.

Em função dessas variáveis é possível elaborar algoritmos para controle coordenado das cargas, estabelecendo prioridades em função do horário de modo a garantir a distribuição uniforme das mesmas.

Uma instalação que possa incorporar automaticamente as variáveis ambientais e da demanda tem a capacidade de se adaptar a essas mudanças, obtendo desempenho melhor em qualquer época do ano.

Isso reafirma o benefício da automação e da medição como base para obter um sistema inteligente para as instalações elétricas residenciais e assim obter um desempenho ótimo. Para isso, é preciso interpretar os dados obtidos e assim estabelecer as ações pertinentes. Um exemplo disso pode ser a análise e correção do fator de potência.

Essa análise se baseia nos padrões de comportamento contidos nos gráficos e serve para diagnosticar problemas numa instalação do ponto de vista da demanda, revelando a ineficiência no aproveitamento energético do sistema.

Conforme se pode observar na Figura 5.11, tanto a potência ativa como o fator de potência variou durante o período de medição, apresentando um padrão de comportamento discernível.

Nos momentos de maior demanda se observa que o fator de potência apresenta os maiores valores e nos momentos de menor consumo o padrão se inverte.

Isso sugere que as cargas que demandam maior potência têm fator de potência próximo do unitário, ao contrário da carga base. Dessa forma se pode recomendar a verificação dos equipamentos com potência inferior a 2000W (< 0,2 p.u.) para corrigir seu fator de potência. A medição específica dos aparelhos de iluminação e de outras cargas que constituem a potência básica, nesses casos, provavelmente apontará a necessidade de se corrigir o fator de potência nessas unidades.

Dependendo do caso a correção do fator de potência pode não se justificar economicamente, conforme indicado no capítulo 2.

Isso implica na cobrança de multas quando o valor do fator de potência é menor que 0,92, fato esse que é taxado como um excedente de energia reativa. Através da expressão definida pela ANEEL, reproduzida no capítulo 2, se calcula o valor de energia equivalente ao excedente reativo.

Existem períodos em que ocorre cobrança de multas, como se observa no gráfico da multa e da potência ativa em função do tempo (Figura 5.12). O valor de base da potência corresponde ao maior valor registrado, ou seja, 9883W. A escala de tempo é de 1000 minutos por divisão e abrange um intervalo de aproximadamente 120 horas ou cinco dias, sendo feito um registro a cada dez minutos.

O valor da multa multiplicado por 100 corresponde ao percentual a ser acrescentado no valor da energia consumida no intervalo da amostra (uma hora).

Por exemplo, existem momentos em que se acrescentam 40% ao valor da energia consumida no período, mas, no entanto a demanda nesses casos é relativamente baixa.

**Figura 5.12 – Variação da potência ativa e excedente reativo**
Fonte: (Autoria própria)

Medidas operacionais simples podem ser adotadas, como a combinação de sensores de presença e controladores horários em luminárias com baixo fator de potência. Nos

horários de menor demanda essas cargas que geralmente são destinadas a manter um nível mínimo de iluminação ambiente para o trânsito seguro de pessoas podem ser desligadas de modo seletivo.

Nesses casos um controlador horário mantém ligada a carga base de iluminação nos horários de pico, pois se supõe que há maior fluxo de pessoas no local e nos horários de menor consumo o sensor de presença aciona as luminárias somente quando necessário.

Dessa forma o consumo nos momentos em que o fator de potência é menor se reduz, sendo uma forma de contornar o problema, pois o excedente reativo também é função do consumo de energia ativa. Por outro lado, nos momentos de ponta o fator de potência também é elevado de modo que a influência das cargas nocivas está diluída de tal forma que corrigir não é necessário.

A forma de lidar com o problema envolve os custos de aquisição e manutenção do equipamento necessário à correção comparado a economia obtida, conforme estabelecido no capítulo 2, e envolve as possíveis soluções técnicas ou operacionais, como a indicada nos parágrafos anteriores.

Se a instalação elétrica do exemplo contivesse elementos de controle automático e medição inteligente a solução operacional poderia ser empregada facilmente coordenando os sinais emitidos pelo sistema de medição com o controle da carga de iluminação.

Isso significa que conhecendo o funcionamento do sistema de medição, a carga instalada associado ao comportamento das curvas de demanda, é possível projetar um sistema automático eficaz e econômico para otimizar o uso da energia nas instalações residenciais.

# 6. APLICAÇÃO DOS NOVOS RECURSOS DA MEDIÇÃO E DO CONTROLE NA AUTOMAÇÃO DAS INSTALAÇÕES RESIDENCIAIS

Partindo da premissa de otimização dos recursos de geração, transmissão e distribuição de energia através do deslocamento da demanda da ponta para horários de menor carregamento se deduz que as instalações elétricas devem evoluir para incorporar essa possibilidade. A introdução da modalidade de tarifa branca sinaliza a importância dessa premissa para a sociedade e visa modificar os hábitos de consumo.

Como a energia elétrica normalmente é utilizada no momento em que é gerada nos sistemas de potência, o deslocamento de cargas em princípio somente seria possível pela mudança de hábitos de consumo, que muitas vezes está além da capacidade do consumidor.

A solução para o problema depende da possibilidade de armazenamento de energia elétrica que geralmente é convertida em outras formas no processo. Por exemplo, uma bateria de acumuladores acumula energia nos reagentes químicos, cuja reação reversa libera eletricidade.

Outras formas de energia podem ser aproveitadas no sistema de gerenciamento da energia elétrica, utilizando todo o potencial energético em uma edificação.

Por exemplo, uma caixa de água é um reservatório elevado que também armazena energia potencial gravitacional se considerarmos o trabalho para deslocar o líquido.

Grande parte dos processos que envolvem o uso da água como recurso em uma residência implica no fluxo desse líquido o que implica em trabalho. Nas instalações sanitárias a água exerce trabalho ativo no transporte dos dejetos.

Assim os meios hidráulicos podem ser incluídos no estudo e planejamento energético da instalação elétrica, utilizando os períodos de armazenamento de água na caixa em horários mais favoráveis. Isso é uma estratégia um pouco mais sofisticada do que simplesmente completar o nível da caixa que atualmente existe em muitas edificações.

O exemplo simples permite observar que existe muita aplicação para dispositivos automáticos nas edificações para otimizar os recursos energéticos.

A aplicação do conceito de rede inteligente cria mercado para o desenvolvimento de equipamentos mais sofisticados para aplicações relativamente simples e a integração destes as redes de informação mais complexas e coordenadas levando a sistemas complexos para o gerenciamento da energia nas edificações. A conseqüência disso é a necessidade do conhecimento operacional desses sistemas, sua filosofia e evolução.

O conhecimento operacional desses sistemas é bastante específico e extenso para os objetivos deste trabalho. Por outro lado sua o conhecimento de sua filosofia e evolução podem contribuir para a compreensão de como os recursos para gerenciamento da energia nas edificações podem contribuir com o deslocamento da demanda.

## 6.1. Evolução do gerenciamento computadorizado de energia

A evolução dos controles automáticos utilizados em edificações começou pelos idos de 1880. A primeira inovação era o termostato bi-metálico que controlava a temperatura do ambiente pelo ajuste do regulador de um forno a carvão ou uma caldeira. Em 1890, o primeiro controle pneumático estava disponível (42).

Hoje o controle automático de energia se tornou comum em construções não residenciais de grande porte coordenado por um sistema computadorizado como central de processamento. Esses sistemas são conhecidos pelas suas siglas em inglês: “Energy Management Systems” (EMS), “Energy Management Control Systems” (EMCS) ou “Building Automation Systems” (BAS). Atualmente os proprietários de prédios e gerentes das instalações devem regularmente orientar o despacho do sistema de gerenciamento de energia computadorizado pelo acesso aos sistemas existentes, especificação e comissionamento de novos sistemas, avaliação das opções de contrato de serviços ou otimizando as operações EMS (42).

A tecnologia de controle está evoluindo rapidamente. Mesmo para os novos sistemas há muitas possibilidades para reposições e aperfeiçoamentos: computadores mais poderosos e baratos, maior nível de controle das zonas, sensores mais precisos, programas de controle mais complexos, serviços melhores, etc. O avanço da tecnologia combinado com a dinâmica natural das edificações torna as decisões mais complicadas e difíceis para os administradores (42).

Muitas das características avançadas desses sistemas não são totalmente aproveitadas. Por exemplo, a capacidade de monitorar e detectar tendências desses sistemas são poderosas ferramentas para otimizar o desempenho na demanda por aquecimento, a ventilação, condicionamento de ar e a iluminação. Entretanto, muitos administradores e operadores de sistema não têm tempo para investigar todos os recursos disponíveis. Aqueles que são responsáveis pelo aperfeiçoamento do sistema ou sua aquisição nem sempre são capazes de estudar a exata necessidade de energia de suas instalações e acabam confiando nas especificações dos vendedores. Dessa forma eles podem não

receber o sistema ótimo para suas edificações. Além disso, o processo de comissionamento que pode ser crítico no sucesso do sistema, é relativamente desconhecido para muitos daquele pessoal encarregado das instalações. (42)

Isso obviamente se aplica a edificações onde há o gerenciamento automático de energia e geralmente ocorre em função das exigências econômicas das instalações. No ambiente industrial e comercial de grande porte há uma grande exigência para otimizar o uso do recurso energético e no ambiente residencial não é prática comum.

Isso provavelmente se deve ao fato dos sistemas envolvidos para otimizar o desempenho energético das instalações ser oneroso para os proprietários das construções e ainda não se percebem os benefícios a serem alcançados ou estes são insuficientes. Além disso, esses sistemas de grande porte exigem operadores qualificados, nem sempre disponíveis na operação dos condomínios residenciais, por exemplo.

O desenvolvimento de sistemas automáticos que possam ser instalados e operados a partir de recursos mais comuns é desejável e pode contribuir para maior difusão desses conceitos na operação das instalações residenciais.

O foco nas instalações residenciais é interessante para o estudo, pois além de representar um importante grupo de consumidores de energia, aproximadamente 24% do total segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2011, também há menor difusão das aplicações práticas para sistema de gerenciamento automático de energia no setor.
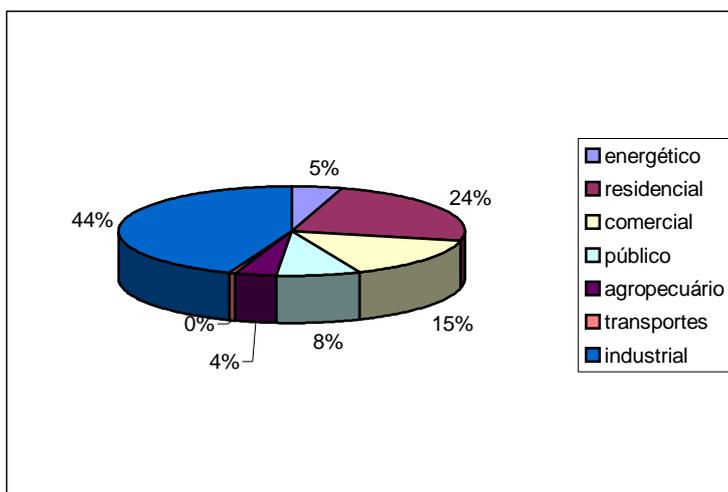
**Figura 6.1 – Participação no consumo de energia elétrica por setor.**
Fonte: [Autoria própria com dados extraídos do BEN 2011]

O pré-requisito fundamental para as aplicações residenciais é que o sistema seja simples para operar, mas ainda deve ser capaz de trabalhar a partir de conceitos técnicos mais complexos.

Além disso, o amplo aproveitamento de toda energia captada pelas edificações envolve o gerenciamento integrado de recursos. Painéis solares, geradores distribuídos, aproveitamento de rejeitos térmicos de outros processos exigem maior flexibilidade dos meios de transporte, armazenamento e controle integrado desses recursos. Nesse sentido a aplicação de sistemas desenvolvida para as aplicações de automação industrial, do tipo “SCADA” pode ser interessante, desde que se respeite o limite técnico e econômico envolvido.

## 6.2. Aplicações residenciais

A aplicação de dispositivos automáticos em residências para prover conforto e funcionalidade é uma realidade desde que a eletricidade passou a ser um bem de consumo generalizado. Dispositivos simples como minuterias e sensores foto - elétricos que controlam a iluminação de áreas comuns dos edifícios, sensores de nível para controle de bombas de água, comandos elétricos por relés e contatores para o controle dos elevadores, termostatos, etc. fazem parte da realidade de muitas residências há muitos anos.

Esses dispositivos sofreram aperfeiçoamento ao longo dos anos e se tornaram mais sofisticados ao incorporar os avanços da eletrônica digital e de potência. Além disso, muitos desses dispositivos foram integrados para trabalhar em conjunto em sistemas de gerenciamento computadorizado de energia, conforme descrição prévia.

Dessa forma o que se conhece por edifício inteligente (do inglês “smart building”) representa a evolução dos sistemas automáticos nas instalações prediais e incorpora os avanços na filosofia de integração dos sistemas, o que inclui os serviços elétricos.

A difusão dos dispositivos mais avançados para as aplicações residenciais muitas vezes é defasada em função dos preços desses equipamentos que em um primeiro momento é elevado devido ao custo para o seu desenvolvimento e depois tende a diminuir com a produção em escala. Além desse componente fundamental, a praticidade de uso é um item importante para as aplicações residenciais, pois um sistema muito sofisticado, porém de uso demasiadamente complicado tem pouca receptividade neste mercado. Dessa forma se criam dispositivos mais simples para aplicações domésticas e esses

desenvolvimentos explicam a defasagem encontrada na aplicação de tecnologia mais sofisticada.

Mesmo que esteja disponível no mercado uma tecnologia para uso do consumidor, este não a empregará até perceber sua utilidade prática. Em um tempo recente esse consumidor geralmente não tem percebido a necessidade de uma tecnologia de controle mais sofisticada, mas isso tende a mudar.

Atualmente muito se discute sobre a disponibilidade de recursos naturais e seu uso racional, o que levou a muitos governos a acirrarem o controle dos insumos, particularmente o energético. Com essa premissa se busca integrar o consumidor residencial na cadeia de controle energético e para isso é necessário buscar sua participação.

Como o número desses consumidores é elevado, a ação coordenadora é complexa, ainda mais se considerar um sistema que necessita de decisões em tempo real como o elétrico, para a operação ótima dos recursos. Essa ação só é possível através de sistemas de automação, controle e medição mais sofisticada.

A idéia da casa de energia zero (do inglês Zero Energy Home – ZEH) apresentada pelo departamento de energia dos Estados Unidos no Automated Home Energy Management Expert Meeting, em Denver, no Colorado em 2009 indica que o gerenciamento automático da energia deve ser feito pelos seguintes motivos: (43).

- Reduzir o uso residencial da energia em construções novas e existentes;
- Cortar os picos de carga da rede;
- Melhorar o conforto das habitações;
- Responder aos picos de preço críticos, nuvens, etc.
- Otimizar o consumo de energia para calefação, pois muitas pessoas não têm tempo para programar seus termostatos programáveis.

Há uma ênfase na otimização da capacidade energética do sistema indicada na premissa de se cortar picos de carga da rede. O deslocamento da demanda é condição fundamental para controlar os picos no sistema e sua importância se observa na existência do chamado “horário de verão”.

Essa é uma medida de deslocamento de demanda mais simples de aplicar, entretanto com a evolução do consumo tende a ser insuficiente.

Dessa forma meios mais sofisticados são necessários e esses tendem a alcançar o consumidor residencial impondo restrições ao uso da energia em períodos críticos e incentivando seu uso em momentos mais propícios.

Para conciliar as suas necessidades com as restrições impostas ao fornecimento, o consumidor deverá avaliar as opções disponíveis para gerenciar seus recursos. Essas opções muitas vezes implicam em ações em períodos em que o consumidor não pode atuar sobre suas instalações de modo que sistemas de controle automáticos locais ou remotos podem ser necessários.

### 6.3. Meios para gerenciamento integrado de recursos

O deslocamento do consumo de energia elétrica implica na necessidade de meios para acumular nos períodos em que ela é mais acessível e ser utilizada quando ela é mais necessária.

Fundamentalmente o dispositivo que armazena energia elétrica é o capacitor que é formado basicamente por um conjunto de duas placas, separadas por um meio dielétrico e que acumula cargas de sinais opostos por efeito da ação de um campo elétrico.

Embora seja bastante utilizado na eletrotécnica os capacitores não tem capacidade suficiente para armazenar energia na escala necessária para manter o consumo de uma instalação normal e por isso geralmente se utiliza em aplicações onde o armazenamento ocorre em períodos de curta duração.

Assim, os dispositivos que atualmente são utilizados para armazenar a energia elétrica não o fazem dessa forma, isto é, eles conservam a energia em outras formas e quando necessário convertem para energia elétrica. Por isso o uso da energia elétrica está vinculado a sua geração.

Esse princípio que se aplica à energia fornecida pela concessionária e também aquela gerada dentro das dependências do consumidor orienta a forma de escolha de meios para armazenamento de energia. Neste caso melhor seria considerar o serviço prestado pela energia elétrica que permite que outras formas de energia participem do processo a fim de otimiza-lo.

Nas instalações a energia é convertida nas seguintes formas: térmica (calor), luminosa e mecânica (potencial e dinâmica).

O serviço prestado pela energia elétrica convertida para essas formas finais pode ser auxiliado ou substituído por fontes externas conforme a aplicação. Entretanto pode ser vantajoso do ponto de vista da flexibilidade da instalação a operação híbrida com eletricidade.

Existem aplicações que não funcionam adequadamente sem energia elétrica, tais como alguns sistemas automáticos, computadores, televisores e lâmpadas elétricas. Nestes

casos se deve elaborar um projeto prevendo a geração local que envolve os geradores solares, eólicos e abrange os acumuladores que recebem a energia elétrica da rede e a armazenam na forma química. Muitas configurações são possíveis em função das propriedades dos elementos envolvidos, mas para efeito de simplificação neste trabalho se adota a premissa de que o armazenamento energia é condição fundamental.

A partir dessa hipótese se discutem os meios pelos quais os componentes podem ser integrados em um sistema do ponto de vista de seus potenciais técnicos.

### 6.3.1. Sistemas de baterias

A operação de acumuladores elétricos tem as suas particularidades, pois envolvem sistemas eletroquímicos complexos que necessitam de dispositivos de controle sofisticados.

As baterias eletroquímicas representam a tecnologia de obtenção de energia elétrica mais antiga e ainda hoje a mais utilizada para o seu armazenamento. É o dispositivo que converte energia química em energia elétrica, sob a forma de corrente contínua, quando no processo de descarga e vice-versa no processo de carga.

O rendimento do processo é afetado pelas perdas, pois durante o seu uso as baterias perdem energia sob a forma de calor e sofrem de um processo de autodescarga, devido às reações químicas internas.

Os principais tipos de baterias utilizados atualmente são as baterias chumbo ácido, as baterias de níquel e cádmio, as baterias de hidretos metálicos de níquel, as baterias de íons de lítio e as baterias de íons de lítio com eletrólito de polímero. O elevado custo de aquisição, operação e manutenção têm restringido seu uso a aplicações específicas, como os sistemas de emergência e aparelhos portáteis.

A tabela a seguir apresenta algumas características fundamentais das baterias.

Tabela 6.1 – Características básicas de acumuladores eletroquímicos.

| Tipo de bateria | Níquel e cádmio | Hidretos metálicos de níquel | Íons de lítio | íons de lítio com eletrólito de polímero | Chumbo ácido. |
|---|---|---|---|---|---|
| Tensão por célula [V] | 1,2 | 1,2 | 2,5 | 3,6 | 2,0 |
| Ciclo de vida (80% da capacidade inicial) | 500 a 1000 | 500 a 1000 | 500 a 1000 | 300 a 500 | 200 a 300 |
| Comparação de custo pacote 7,2V | R$115,00 | R$138,00 | R$230,00 | R$230,00 | R$80,00 |
| Densidade de energia [Wh/kg] | 45 a 80 | 60 a 120 | 110 a 160 | 100 a 130 | 30 a 50 |

Fonte: TRINDADE, 2006.

As baterias de íons de lítio apresentam maior potencial de aplicação, porém o seu custo elevado restringe sua aplicação aos dispositivos portáteis.

Os veículos elétricos podem representar uma alternativa para viabilizar o uso de baterias nas instalações elétricas residenciais, pois o benefício resultante de sua aplicação para deslocamento da demanda seria associado ao transporte. Além disso, os recursos técnicos necessários à manutenção dessas baterias são aqueles disponíveis para o veículo.

Esse recurso já pode ser considerado como normal, pois o veículo movido a motor a combustão com vasta distribuição pelo mundo já utilizam serviço técnico especializado para sua manutenção que é prestado pela rede de oficinas existentes. Ainda que não seja usual o motor desses veículos pode ser adaptado para produzir energia elétrica, por exemplo.

No caso do veículo elétrico o usuário poderia conectá-lo na rede doméstica quando estivesse em casa e este forneceria energia nos horários em que ela fosse mais cara, recuperando a carga no momento de baixa no preço desse insumo.

Em um futuro próximo essa perspectiva não estará ao alcance de uma parcela significativa da população, pois esses veículos não são comuns e as instalações elétricas

residenciais precisariam ser adequadas para esse fim. Como exemplo ilustrativo, os edifícios de apartamentos existentes precisariam adaptar extensões elétricas especiais nas garagens para os veículos. Isso implicaria em haver vagas específicas para os moradores, o que não ocorre em muitos edifícios. De qualquer modo as implicações das mudanças envolvidas no processo estão além dos limites físicos das instalações e não podem ser enumeradas neste trabalho devido à sua complexidade.

Atualmente a tecnologia mais difundida para armazenamento de energia é a da bateria chumbo-ácida. Por ser uma tecnologia clássica e consolidada é a de mais fácil aquisição, porém os custos associados à sua operação somente são justificados nas instalações elétricas como fontes auxiliares nas situações de emergência ou em comunidades isoladas.

Essa solução é particularmente atraente, pois pode receber a energia gerada por painéis solares que são compatíveis com o nível de tensão das baterias mais comuns.

Os acumuladores elétricos que operam através de reações eletroquímicas operam com corrente contínua o que impossibilita seu uso direto nas instalações elétricas que operam com corrente alternada. Esse fato implica na utilização de dispositivos conversores necessários a condicionar a energia de forma a compatibilizar a bateria com a rede elétrica.

Basicamente esses conversores são baseados em retificadores e inversores e dessa forma no ponto de conexão da bateria haverá obrigatoriamente um ponto onde a tensão é contínua.

Além disso, conforme indicada no capítulo 4, a correção do fator de potência para as cargas não lineares pode utilizar filtros ativos. Esses filtros possuem em sua composição partes que operam com tensão contínua, havendo elementos nos circuitos similares aos conversores CC-CC (corrente contínua para corrente contínua).

Além disso, a operação com corrente contínua é menos exigente com a qualidade do sinal entregue na saída, diferente de um inversor que entrega um sinal senoidal que não deve ser distorcido e precisa ser sincronizado com a rede, no caso da operação em paralelo.

Uma parcela considerável dos equipamentos elétricos de uma instalação é compatível com a corrente contínua. Exemplo disso são as lâmpadas compactas, os computadores e os televisores, pois todos eles possuem fator de potência baixo e muitos deles podem operar com tensão contínua com valor próximo do nominal definido para corrente alternada.

Esses equipamentos poderiam então ser ligados em um circuito comum, alimentado por um conversor CA/CC com alto fator de potência, similar ao filtro ativo utilizado para a correção, o que eliminaria um problema para o grupo de equipamentos.
Esses fatos associados podem reavivar o interessante para a aplicação da corrente contínua como forma de transmitir a energia elétrica dentro de uma edificação.

### 6.3.2. Instalações e equipamentos elétricos em corrente contínua.

Motivo de debate no princípio da indústria de energia elétrica a modalidade de corrente foi definida a favor do sistema alternado para as instalações fixas. O principal fundamento em favor desse sistema é a flexibilidade para lidar com o fluxo de potência no transporte de energia a grandes distâncias.
A potência elétrica transmitida pela linha é definida grosso modo pelo produto do valor da tensão pelo valor da corrente. A perda elétrica por condução é proporcional ao quadrado do valor da corrente elétrica multiplicada pelo valor da resistência dos condutores.
Dessa forma, considerando que os geradores são limitados pela tensão de isolação o transporte energia com altos valores de corrente e a grandes distâncias é inviável, pois as dimensões físicas dos condutores seriam impraticáveis, além das perdas serem muito grandes. Para solucionar esse problema é utilizado um equipamento denominado transformador que possibilita condicionar a energia de modo a ajustar o nível da corrente a um patamar que pode ser praticado. Essa operação envolve a elevação do nível de tensão proporcionalmente de modo que no ponto da entrega a energia deve ser novamente condicionada para valores utilizáveis.
Como os transformadores somente operam com corrente alternada, houve uma preferência por esse sistema devido à proliferação de grandes centrais geradoras longe dos centros de consumo, principalmente no caso das usinas hidrelétricas.
A corrente alternada se consolidou como meio de transporte da energia elétrica e equipamentos e circuitos foram desenvolvidos para operar nesse tipo de rede.
Por outro lado a corrente contínua pode ser vantajosa em pequenas distâncias, se consideramos algumas de suas características:

- Os principais dispositivos que armazenam energia o fazem em corrente contínua;

- q Todos os equipamentos eletrônicos operam fundamentalmente em corrente contínua e em um sistema de distribuição desse tipo os retificadores individuais podem ser substituídos por um sistema maior e mais eficiente. Por outro lado muitos equipamentos hoje utilizados com tensão alternada podem operar em tensão contínua de valor semelhante;
- q A operação com corrente contínua pode anular o efeito da queda de tensão na reatância das linhas internas das edificações. Isso é uma vantagem na operação de circuitos com altos valores de corrente;
- q Dentro da instalação CC, em princípio não há potência reativa. Pois o efeito das reatâncias se anula com freqüência nula. Por outro lado mesmo os equipamentos eletrônicos que operam em CC podem produzir ondulações que correspondem a oscilações harmônicas de modo que não se pode desprezar totalmente o efeito de reativos. Mas se trata de um efeito colateral de menor envergadura que o efeito dos reativos em corrente alternada;
- q A medição e controle podem ser mais simples do que em corrente alternada, pois em princípio se controla somente o nível da tensão contínua. No caso da tensão alternada normalmente se controlam seu nível, sua freqüência e a forma de onda que deve ser senoidal;
- q Painéis solares fotovoltaicos fornecem tensão contínua e dessa forma a ligação destes com a linha elétrica pode ser simplificada;
- q Seguindo a mesma linha de raciocínio, pequenos geradores eólicos podem ser conectados na linha CC;
- q Pode ser utilizada para mitigar os efeitos dos SAGs e SWELs

Devido à evolução dos equipamentos eletrônicos, a utilização da corrente contínua e com baixa perda pode ser viável empregando muitos dos elementos das instalações já existentes em corrente alternada e em alguns casos até coexistindo com ela.

O estudo das características dos equipamentos e da rede elétrica pode determinar a forma de harmonizar circuitos de corrente contínua e alternada.

#### 6.3.2.1. A configuração da rede CC

O estudo para aplicação de uma rede suprida por tensão contínua é em função das suas características operacionais. Para isso além da configuração básica proposta é

necessário analisar o comportamento dos diversos elementos que constituem a instalação.

O primeiro elemento a ser estudado é a configuração da rede que indica a maneira como os componentes são interligados e se comportam no sistema.

A configuração básica da rede não deve ser muito diferente das redes convencionais, o que é uma vantagem, pois aproveita muito dos seus elementos.

Basicamente a linha é composta por um circuito principal e as unidades de saída, com base na configuração apresentada na norma NBR IEC 60439-1(44). O circuito principal interliga todas as unidades de entrada e saída que podem ser alimentadores AC, DC ou as cargas nos circuitos terminais. As definições extraídas da norma são:

- “Barramento principal: Barramento no qual podem ser conectados um ou vários barramentos de distribuição e/ou unidades de entrada e de saída”.
- “Unidade de entrada: Unidade funcional através da qual a energia elétrica é normalmente fornecida para o conjunto”.
- “Unidade de saída: Unidade funcional através da qual a energia elétrica é normalmente fornecida para um ou mais circuitos de saída”.

A definição da estrutura do sistema de distribuição em corrente contínua envolve a determinação do esquema da rede e do valor da tensão nominal.

Além disso, é importante comparar a capacidade das linhas de corrente contínua com as linhas em corrente alternada de mesma seção transversal, relacionando a potência transmitida com o comprimento da linha e dessa forma escolher a melhor solução do ponto de vista técnico e econômico.

Devem ser considerados também os equipamentos auxiliares necessários, tais como inversores, retificadores, transformadores para as linhas CA, etc. para ponderar a melhor solução.

Por exemplo, uma edificação que possui um painel de geradores solares e uma ligação na rede da concessionária pode adotar diversas configurações possíveis contando com inversores e retificadores. Esses equipamentos designados genericamente como conversores podem ter seu número reduzido significativamente com a adoção de um sistema de distribuição em corrente contínua, o que implica na diminuição das perdas associadas a eles. Isso é possível devido à evolução dos conversores em corrente contínua que permitem condicionar a energia com nível de perda aceitável.

As principais características de um sistema desse tipo podem incluir:

- Absorção da energia da rede da concessionária sem alterar a forma de onda e com alto fator de potência e
- Permitir o fluxo bidirecional da energia.

O custo pode ser significativamente favorável para uma modalidade de corrente ou pela alternada, mas a premissa mais interessante para estudo é a possibilidade de utilizar indistintamente os equipamentos já existentes conforme a conveniência do usuário.

As lâmpadas incandescentes, que neste momento tendem a cair em desuso possuem essa capacidade. Conforme se observará posteriormente neste texto a evolução da eletrônica de potência permite a construção de fontes de energia para os equipamentos muito flexíveis e de maior rendimento.

Isso produz equipamentos que podem operar indistintamente com corrente alternada ou contínua em uma ampla faixa de tensões. Por exemplo, algumas fontes automáticas podem operar na faixa de 100 a 240V sem a intervenção do usuário.

Mesmo que os equipamentos possuam grande flexibilidade é importante para o controle da rede CC que haja um conjunto de regras básicas operacionais, para o caso de falha no sistema supervisor (45):

- O barramento CC deve ser mantido estável dentro de uma faixa aceitável (por exemplo, no entorno de 5%);
- Os conversores utilizados entre o barramento CC e as fontes renováveis devem ter capacidade para lidar com toda a energia gerada por esses componentes, desde que haja carga para absorve-la, bateria para ser carregada ou a possibilidade de exportar para a rede da concessionária;
- O sistema de armazenamento de energia deve ser abastecido logo que possível e descarregado somente quando necessário e
- O conversor ligado à unidade de entrada ou saída da concessionária deve absorver a potência da rede, sempre que as fontes renováveis locais forem insuficientes e exportá-la quando houver excedente.

Para atingir esses objetivos o esquema sugerido (45) abrange os elementos ilustrados na figura a seguir.
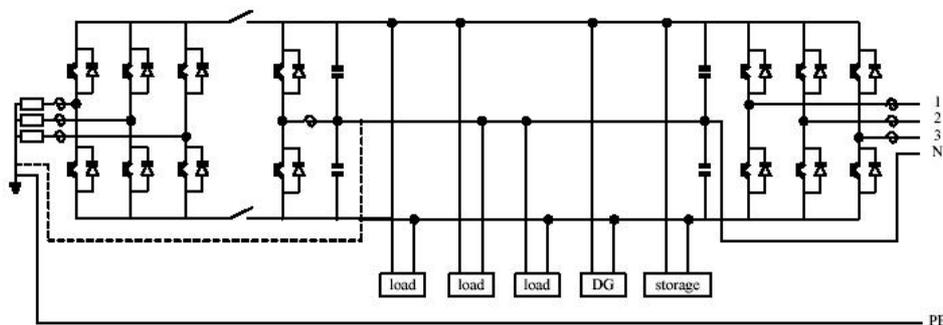
**Figura 6.2 – Esquema de uma possível configuração de rede CC**
Fonte: (AUGUSTONI, M. et al., 2003)

A premissa de que a rede CC deve agregar várias fontes e operar com segurança implica em cuidados com o sistema de controle e medição.

A coordenação da rede pode ser feita por um sistema computadorizado que define prioridades em função de critérios de despacho, ligando e desligando elementos da rede procura otimizar seu uso. Essa filosofia tende a reproduzir em pequena escala o que se observa na operação do sistema de potência interligado.

Este sistema de controle constitui um ponto crítico no sistema na medida que a falha deste poderia paralisar as operações. No entanto, se for respeitada a premissa de estabilidade da tensão do barramento principal CC, o sistema pode ser coordenado pelo nível de tensão.

Podem ser estabelecidos níveis de tensão que determinariam a operação de determinada fonte, desde que a variação entre esses níveis seja compatível com os dispositivos envolvidos.

Por exemplo, o maior nível de tensão poderia ser ajustado para uma fonte renovável, um nível menor para a concessionária e o menor para um sistema de baterias. Quando a fonte renovável opera dentro de sua capacidade um sistema automático controlado por tensão pode conectar ao barramento principal. Esse nível de tensão inibe a conexão com a rede da concessionária e sinaliza para carga da bateria, se necessário. Da mesma forma pode haver a coordenação com a rede da concessionária e a bateria, na falta da fonte renovável.

Como esse circuito opera em corrente contínua o ato de implementar fisicamente os elementos de controle é relativamente simples e admite varias hipóteses.

No caso de extrema simplicidade a fonte renovável e a rede da concessionária podem ser ligadas respectivamente através de um diodo. Dessa forma somente a fonte com maior nível de tensão fornece energia ao barramento CC.

Supondo que a necessidade de exportar energia para a concessionária seja condição importante para o proprietário da instalação, é necessário um conversor, que permita o fluxo de potência bidirecional, absorção senoidal e a regulação da tensão CC. O dispositivo sugerido como capaz de atender a todos esses requisitos é um conversor comutado forçado, através de transistores IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor) com diodos “free-wheeling” como válvulas principais (45).

A única limitação dessa configuração é que a tensão da seção CC tem de ser suficientemente maior do que o valor de pico da tensão de entrada visando evitar a sobre-modulação do conversor.

Isso implica na utilização de valores de tensão maiores do que aqueles normalmente usados na rede de distribuição de BT, em CA, ou o uso de um transformador apropriado, interposto entre o inversor e a rede de distribuição.

O valor da tensão CC sugerido em estudos anteriores (45) como 800V pode ser muito elevado para algumas cargas e para geração distribuída de pequeno porte (por exemplo, sistemas com painéis fotovoltaicos). Uma possibilidade é criar alimentadores com uma tensão menor, que pode ser obtida com a instalação de um condutor neutro (representado pela linha tracejada na Figura 6.2).

Com essa configuração, se a soma das cargas entre um pólo e o neutro não for compatível com a soma das cargas entre o outro pólo e o neutro, as duas tensões pólo-neutro podem ter valores diferentes, dependendo do desequilíbrio e do tipo das cargas. Esta é uma situação inaceitável, pois pode prejudicar o funcionamento das cargas (tensão muito baixa para algumas e muito alta para outras) e da mesma forma pode ser nociva ao conversor de interface. Para evitar essa situação é necessária a inserção de um conversor de balanceamento, o qual distribui por igual a carga nos dois pólos. Conseqüentemente, a barra CC pode ser formada por três condutores: o pólo positivo, o negativo e o neutro, que assume as mesmas funções que o correspondente no sistema CA e pode ter uma seção transversal reduzida se a carga for suficientemente equilibrada.

Neste sistema CC, com a interposição de um inversor podem alimentar cargas CA: os valores elevados de tensão CC permitem a instalação de inversores de três pernas, sem transformador de saída, capazes de constituir um sistema trifásico com os valores de tensão de linha, se o inversor estiver conectado entre os dois pólos, conforme ilustra a figura anterior.

Com relação ao sistema de aterramento da seção CC, o seu condutor de neutro pode ser conectado ao sistema de aterramento do transformador da subestação (linha tracejada na figura 6.2) ou pode ser deixado flutuante. Essas duas soluções possuem características diferentes sob o ponto de vista da segurança.

Outras abordagens para a configuração do sistema divergem substancialmente deste modelo. A viabilidade de um sistema de distribuição CC em pequena escala residencial, não estabelece inicialmente como objetivo que o conversor de interface deve permitir o fluxo de potência bidirecional para que o excesso de potência produzida pelos geradores distribuídos (DG na Figura 6.2) seja injetado na rede pública no sistema CA (46).

Dessa forma a interface que liga a rede CA com a rede CC pode ser unidirecional. No caso de uma aplicação modesta, como a residencial, a quantidade de energia produzida é quase sempre menor que o consumo médio e por isso o fluxo de energia geralmente parte da rede para a residência, especialmente se alguma forma de armazenamento for instalada. Neste caso um conversor bidirecional, por ser mais caro pode não ser a melhor solução.

Por outro lado ainda se pode instalar um conversor CC/CA unidirecional para vender o excedente de energia para a concessionária. Dessa forma a instalação pode ser desenvolvida de maneira escalonada na medida da necessidade o que é desejável em instalações residenciais.

Neste caso os seguintes tipos de retificador devem ser considerados: a ponte de diodos, o retificador controlado e o retificador com correção de fator de potência (PFC). Tecnicamente um retificador trifásico com correção de fator de potência é a melhor escolha, que via de regra não está ao alcance das instalações residenciais. Ele fornece uma tensão contínua controlável, com reduzida distorção harmônica de tensão e melhor fator de potência na interface da concessionária. As duas últimas características são particularmente importantes devido a enorme escala no processo de retificação devido ao grande número de consumidores (residências).

O nível de tensão pode ser determinado em função dos equipamentos a serem alimentados pela rede, por exemplo, as lâmpadas fluorescentes compactas de 110VCA operam com uma tensão de aproximadamente 155VCC. Existem televisores que operam com uma tensão de entrada de 300VCC, mesmo que alimentados por uma rede de 110VCA, pois utilizam circuitos dobradores de tensão. Para saber qual a configuração mais adequada é necessário um estudo de compatibilidade dos equipamentos atuais visando adapta-los a uma rede que opere em corrente contínua.

Quatro níveis de tensão se destacam: 20V, 110V, 155V e 310V. O primeiro nível é compatível com os equipamentos que operam com baixa tensão que geralmente são alimentados por pequenas fontes DC. O segundo nível corresponde ao valor eficaz da tensão da rede CA e pode ser utilizado para os equipamentos resistivos. O nível corresponde ao valor de pico da rede CA, adequados para alimentar certos equipamentos eletrônicos. O quarto nível corresponde ao dobro do valor de pico da rede CA, pois existem equipamentos que utilizam dobradores de tensão.

A tensão do barramento principal, todavia deve ser definida como um valor fixo maior que a utilizada pelos equipamentos. Isso é feito para permitir a utilização de retificadores PFC (Power Factor Correction) do tipo “boost” cuja tensão de saída é normalmente maior que na entrada. O nível de tensão depende do estudo do retificador PFC utilizado, porém se encontra na literatura o valor de 600V (46).

Conversores DC/DC associados à topologia do circuito podem tornar compatível a tensão do barramento principal com a tensão das unidades de saída e de entrada.

O uso de baterias geralmente não é recomendável, devido ao custo de aquisição e operação, porém o uso de veículos elétricos pode viabilizar essa escolha.

A absorção das flutuações da rede (SAG, SWELL), neste caso, deve ser obtida empregando-se capacitores, porém a estabilidade da tensão deve ser assegurada por um regulador adequado que é vinculado ao sistema de controle.

Por outro lado um sistema operado com bateria pode ser viável se os indicadores de qualidade de energia (DEC, FEC, DIC, FIC) forem muito desfavoráveis.

Por essas considerações preliminares se entende que o estudo da topologia da rede CC é influenciado pela tecnologia disponível, a qualidade da energia recebida pelo consumidor associado ao custo de aquisição e manutenção dos sistemas e equipamentos.

A tecnologia disponível envolve os equipamentos utilizados nas instalações e sua relação com a rede levando ao estudo das características mais importantes para avaliação dos potenciais envolvidos.

#### 6.3.2.2. Os equipamentos e sua interação com a rede

Para efeito de estudo podemos dividir os equipamentos pela forma como recebem a energia da rede. Alguns equipamentos podem dispor de fontes para condicionamento de energia (geralmente para CC) e outros recebem e utilizam a energia proveniente da rede com suas características intrínsecas.

Equipamentos eletrônicos como televisores, computadores, lâmpadas compactas fluorescentes, etc. mais modernos são supridos por fontes chaveadas de energia.

Esse tipo de fonte recebe a tensão alternada da rede elétrica, retifica, convertendo em tensão contínua e através de processos de transferência de energia em alta freqüência alimenta os circuitos que dela dependem. A característica fundamental deste tipo de fonte é que elas podem controlar grandes quantidades de energia com rendimento superior aos das fontes lineares. Isso facilita o controle automático da tensão de entrada e existem aparelhos como os televisores que dispensam o ajuste da chave de seleção da alimentação da rede para 110 ou 220 V. Muitos desses equipamentos admitem a ligação a uma rede que fornece tensão contínua sem adaptações, pois a sua constituição interna é compatível.

Existem ainda equipamentos que operam de modo intrínseco na rede de corrente alternada ou mesmo aqueles que operam com fontes lineares de corrente contínua e que são dotados de transformadores. Esse tipo de equipamento não pode ser ligado a uma rede que fornece tensão contínua, pois operam com base em elementos indutivos (reatores) que podem causar problemas como curtos-circuitos.

Os equipamentos eletrônicos operam em corrente contínua e em baixa tensão fornecida por fontes projetadas com essa finalidade.

Através do estudo da evolução das fontes de corrente contínua é possível compreender com maior facilidade a tecnologia envolvida, suas limitações e possibilidades.

O retificador de meia onda simples é constituído somente por um diodo ligado à fonte de corrente alternada da rede, que geralmente é um transformador abaixador que converte tensões da ordem de 110 a 220 VCA para algum valor geralmente abaixo de 50VCA.

A saída dessa configuração simples corresponde a uma tensão contínua pulsante que não é adequada a muitas aplicações eletrônicas. Por isso é acrescentado um dispositivo armazenador de energia, denominado capacitor, que fornece corrente nos momentos em que a tensão da fonte de corrente alternada diminui ou inverte sua polaridade, sendo carregado novamente quando a tensão da fonte atinge novamente o valor adequado, no ciclo seguinte. A figura 6.3 a seguir ilustra o processo.
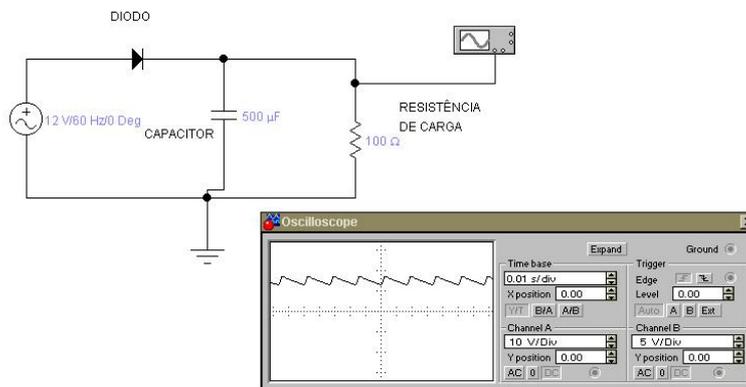
**Figura 6.3 – Fonte CC básica com retificador de meia onda.**
Fonte: [Autoria própria]

A saída do transformador fornece a tensão alternada que é retificada pelo diodo. Esse dispositivo atua como uma válvula e conduz a corrente somente em um sentido indicado pelo seu símbolo. Durante o semiciclo positivo o diodo funciona como uma chave fechada, permitindo a passagem da corrente para carregar o capacitor com a tensão de pico.

Quando a tensão da fonte fica abaixo do valor da tensão do capacitor e no semiciclo negativo o diodo atua como uma chave aberta, a resistência de carga é suprida pelo capacitor.

Ao fornecer energia para a resistência de carga a tensão nos terminais do capacitor cai criando uma ondulação chamada de “ripple” e quanto maior ela for, pior a fonte. A amplitude do “ripple” depende de três fatores: configuração do retificador, valor do capacitor e consumo de corrente.

A configuração do retificador neste caso é de meia onda, que é a mais desfavorável que um retificador em ponte, por exemplo. Quanto maior for o valor do capacitor menor o “ripple”, porém o custo do componente e a perda de energia que ele introduz no circuito aumentam proporcionalmente. O consumo de corrente depende da aplicação ou do trabalho a ser realizado e quanto maior ele for maior o “ripple” gerado em uma dada fonte.

Desta forma o modo de condicionamento do “ripple” é feito através do capacitor e da configuração do retificador.

Uma forma de melhorar o desempenho do circuito é acrescentar diodos de modo a dobrar a freqüência dos pulsos, diminuindo o tempo em que o capacitor fornece a energia para a resistência de carga, de modo que a queda de tensão nos seus terminais é

menor. Essa configuração ilustrada pela figura a seguir é um retificador de onda completa em ponte.
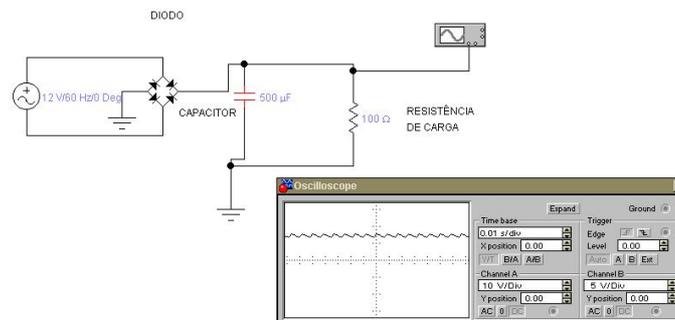
**Figura 6.4 – Fonte CC básica com retificador de onda completa em ponte.**
Fonte: [Autoria própria]

Essa configuração permite que os diodos comutem a tensão alternada da rede de maneira a aproveitar os dois semiciclos. Em cada semiciclo, dois diodos conduzem a corrente elétrica cujo sentido é fixo e sempre sai do retificador no ponto de convergência de dois diodos retornado pelo terminal no qual os dois diodos divergem. Isso determina a polaridade da fonte cujo terminal positivo corresponde no ponto de convergência de dois diodos e o negativo no ponto de divergência. A fonte de corrente alternada se liga aos pontos onde um diodo converge e o outro diverge.

A principal característica a ser observada é que com o aumento da freqüência proporcionada pela configuração do retificador houve uma diminuição do “ripple” da fonte. Dessa forma o capacitor utilizado como filtro no retificador em ponte pode ser menor que aquele ligado no retificador de meia onda, para obter o mesmo resultado final, ou seja, quanto maior a freqüência de saída do retificador, menor o capacitor utilizado na filtragem e esse princípio se utilizam nas fontes chaveadas.

A tensão contínua obtida dessas fontes pode flutuar dependendo da carga ligada na saída ou da tensão da rede. Para eliminar esse inconveniente é possível instalar um grupo de componentes eletrônicos numa configuração de circuito denominada regulador série.

A vantagem desta fonte é o fato da tensão contínua retificada se manter constante, independente da variação da rede ou consumo do aparelho, dentro de certos limites. Outra vantagem é a quase ausência de “ripple” que é praticamente eliminado no processo de regulação.

Nesta fonte é ligado um transistor em série com a resistência de carga que ajusta a tensão de saída em função de uma tensão de referência dada por algum elemento regulador, como por exemplo, um diodo “zener”.
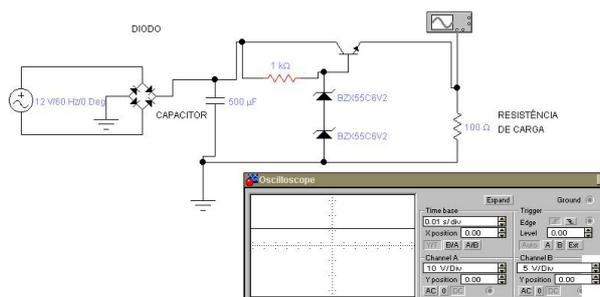
**Figura 6.5 – Fonte CC com regulador de tensão série.**
Fonte: [Autoria própria]

Embora forneça um valor de tensão contínua estável e isento de “ripple” essa fonte apresenta baixo rendimento energético em função das acentuadas perdas no regulador série. A potência perdida no regulador corresponde ao produto da queda de tensão no transistor (diferença de potencial entre a entrada e a saída do regulador) pela corrente na carga e por isso quanto maior o consumo maior a perda. Mesmo que a tensão da entrada dobre a tensão na saída permanecerá estável, desde que se respeitem os limites dos componentes e evidentemente as perdas serão maiores. Esta configuração em princípio poderia ser utilizada para suprir equipamentos ligados em uma alimentação de tensão contínua ao invés da corrente alternada suprida pela rede. No entanto, a maioria das fontes desse tipo opera com um transformador isolador que é ligado na rede e reduz a tensão da ordem da centena de volt para a dezena. Esse componente do circuito não funciona em corrente contínua e por isso as fontes mais antigas não poderiam ser alimentadas por uma linha CC.

Atualmente o problema do baixo rendimento das fontes que dispõe de regulador série tem sido superado por uma configuração denominada como fonte chaveada.

Essa configuração de fonte é utilizada na maioria dos equipamentos eletrônicos, sendo que algumas variações baseadas neste princípio acionam lâmpadas fluorescentes compactas e conversores CC/CC (corrente contínua para corrente contínua).

São fontes que dependem de uma chave, que picota a tensão da entrada, aumentando sua freqüência. O aumento da freqüência facilita a filtragem, diminuindo assim o volume e peso dos componentes de filtro e a ondulação “ripple” e controlando-se o

dispositivo de chaveamento, se pode ainda regular a tensão de saída, sem pagar o ônus do baixo rendimento.

O estudo das topologias dessas fontes nos equipamentos permite determinar se elas podem ser ligadas em uma linha alimentada por tensão contínua e em qual nível.

Existem basicamente dois tipos de fontes chaveadas usadas em circuitos dos televisores, computadores e similares: o tipo “buck” e o tipo “flyback”.

O circuito de entrada da fonte “buck” é composto por um retificador de meia onda com filtro dotado de capacitor. O transistor atua como a chave do circuito e quando fechado alimenta a resistência de carga através do circuito série formado pelo indutor, ao mesmo tempo em que carrega o capacitor de saída. O indutor armazena energia no campo magnético e o diodo de saída nesse momento está polarizado no sentido reverso e se comporta como uma chave aberta.

Quando o transistor acionado pelo circuito de controle se comporta como uma chave aberta, o indutor e o capacitor de saída continuarão a suprir a resistência de carga. Nesse momento o diodo de saída passa a conduzir sendo influenciado pela tensão auto-induzida do indutor que tem um sentido favorável à condução de corrente nesse ramo do circuito. Os ciclos de carga e descarga ocorrem em freqüência próxima a 30 kHz e isso contribui para que a ondulação seja desprezível.

O controle do nível de tensão da saída pode ser feito pela alteração da largura do pulso de controle. No circuito da figura anterior a proporção do tempo ligado para desligado é de 50%. Se essa proporção for alterada para 10% o valor da tensão na saída do circuito cai para aproximadamente 17% daquele observado na condição anterior.
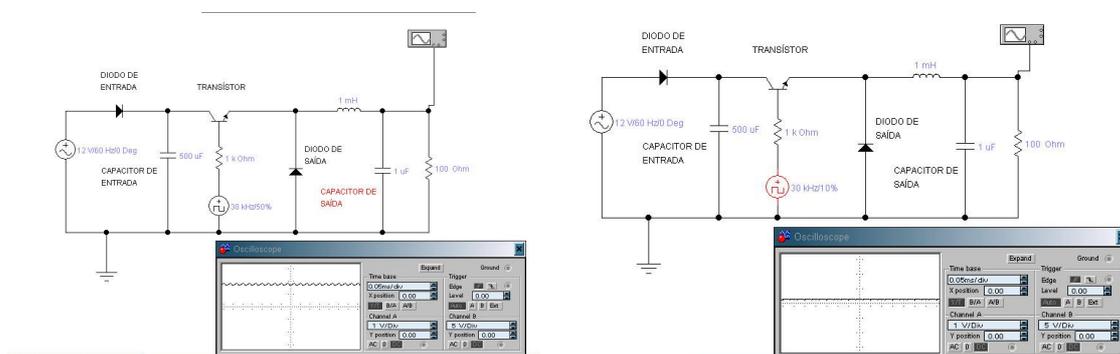
**Figura 6.6 – Princípio de operação da fonte chaveada.**
Fonte: [Autoria própria]

Exemplo de fonte chaveada tipo buck. O circuito da esquerda apresenta largura de pulso de controle de 50%, o da direita 10%.

Existem circuitos integrados dedicados a esse tipo de controle como, por exemplo, o STR81159A e o STR 50112A que possibilitam às novas gerações de equipamentos eletrônicos operarem com segurança em faixas de tensão de 110 a 240VCA. Além disso, tais equipamentos por incorporarem a tecnologia das fontes chaveadas podem operar alimentados tanto por tensão contínua como também alternada. Televisores, computadores e outros eletrodomésticos similares podem e operam com tais fontes.

Mesmo apresentando rendimentos superiores aos similares mais antigos, muitos equipamentos que operam com fonte chaveada ainda têm o fator de potência baixo. Para solucionar esse problema foram desenvolvidas topologias de circuito e métodos de controle para aplicações na correção do fator de potência, mais conhecidas pela sigla em inglês PFC, "Power Factor Correction".

Para aplicações de baixa potência a operação no modo descontínuo de condução ("Discontinous Conduction Mode" DCM), tal como nos conversores "boost" e "flyback" é adequada. A operação no modo contínuo de operação ("Continouous Concuction Mode" CCM) é indicada para aplicações de média e alta potência nos conversores "boost".

O conversor do tipo "boost" é utilizado em aplicações onde a tensão de saída é maior que a de entrada sendo uma configuração muito popular para as aplicações de conversores CA/CC com fator de potência corrigido (49). Esse conversor usa uma ponte para retificar a tensão de entrada alternada para contínua, que é então seguida por uma seção "boost" conforme ilustra a figura a seguir.
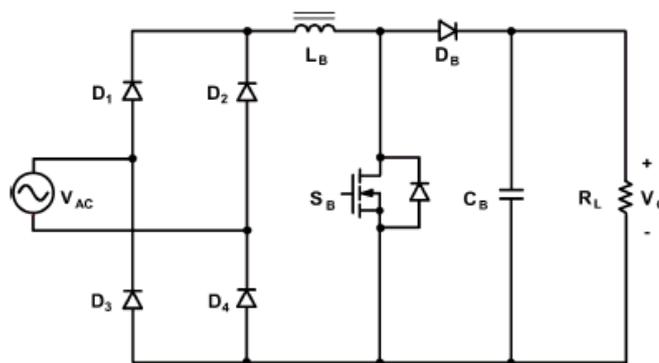
**Figura 6.7 - "conventional boost converter".**
Fonte: (HUBERT, L., et al., 2008)

Essa topologia pode ser aplicada em dispositivos de baixa ou média potência até aproximadamente 1kW. Para potências maiores é possível associar diodos em paralelo, mas o volume do indutor se torna problemático. Nesses casos é melhor utilizar as

topologias que não utilizam a ponte “bridgeless boost converter”. Esse tipo de topologia pode ser empregado para a carga de bateria de veículos elétricos, cuja tensão geralmente é maior que o valor máximo da rede (51).

Com apenas algumas modificações o conversor “boost” pode ser adaptado à fonte “buck” da figura 6.6 a fim de obter um circuito com fator de potência levado.
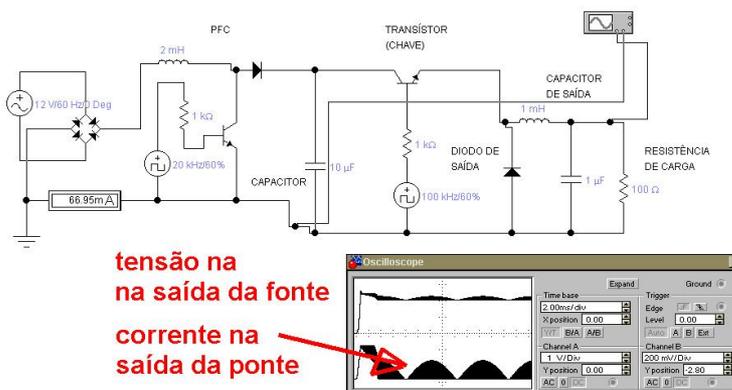
**Figura 6.8 – Princípio de operação “conventional boost converter”.**
Fonte: [Autoria própria]

O circuito para correção do fator de potência está intercalado entre a fonte senoidal e a saída da fonte “buck”, sendo indicado como tendo fator de potência alto. O circuito é formado por um indutor de 2mH, o transistor que opera como chave e é controlado por um gerador de onda quadrada (20kHz) e o capacitor de 10uF. O circuito produz um sinal modulado de corrente, com forma do envoltório de corrente senoidal, mediante o ajuste dos elementos reativos em função da carga na saída e do sinal modulador da fonte de controle. Na figura 6.8 se observa que a forma de onda na saída do retificador, em regime contínuo, tem uma envoltória muito próxima da senoidal, aproximadamente em fase com a tensão da rede. Considerando a presença do retificador em ponte, o sinal de corrente observado pelo lado da fonte de corrente alternada, apresentará as devidas alternâncias pelo efeito comutador dos diodos e como está em fase o fator de potência resultante é elevado.

Atualmente as fontes utilizadas nos microcomputadores são do tipo chaveado geralmente sem compensação do fator de potência, cujo aspecto externo se encontra na figura a seguir.

**Figura 6.9 – Exemplo de fonte chaveada utilizada em computadores.**
Fonte: [Autoria própria]

O estudo dos circuitos típicos desses equipamentos revela muita semelhança entre os diversos fabricantes, com utilização de componentes e circuitos similares. Além disso, outros equipamentos como televisores e carregadores de celular, tem suas fontes que funcionam no mesmo princípio.

A configuração típica de entrada dessas fontes permite que elas sejam ligadas a corrente contínua, com valor compatível com o nominal em corrente alternada. Isso é uma vantagem ao se pensar em uma rede em corrente contínua, pois os equipamentos existentes podem ser utilizados, sem nenhuma adaptação dependendo dos parâmetros da rede CC.

A medição do fator de potência de um computador que emprega esse tipo de fonte revelou valor da ordem de 0,6 para um consumo de potência ativa de 64W, executando apenas a tela inicial do sistema operacional. Conforme indicado no capítulo 4 o fator de potência pode ser corrigido empregando um indutor variável e no ponto ótimo chegou a 0,87. Esse ajuste é bastante delicado e varia com a potência consumida pelo computador que muda conforme se executam as funções. Dessa forma o sistema se torna instável, pois quando a carga varia ocorrem oscilações na alimentação e o computador chega a reiniciar o sistema.

Por isso, nesse tipo de equipamento somente se recomenda a correção ativa do fator de potência ou a correção na própria fonte conforme explicado anteriormente.

O estudo das fontes chaveadas permite entender como utilizar esses dispositivos da melhor forma e assim evitar o impacto na instalação do consumidor e na rede elétrica da concessionária, maximizando os benefícios e atenuando os problemas.

Os principais benefícios percebidos com esses dispositivos eletrônicos estão relacionados ao maior rendimento e a flexibilidade operacional, pois permitem ao consumidor condicionar a energia elétrica de acordo com suas necessidades. Essa classe

de dispositivos e suas variações podem operar com corrente contínua, alternada com freqüência fixa ou variável, em diversos níveis de tensão e corrente.

As variações abrangem os reatores eletrônicos de lâmpadas fluorescentes, conversores estáticos de freqüência, controladores de motores elétricos, que se beneficiaram com a capacidade de controle eficiente da energia.

### 6.3.2.3. Iluminação

As lâmpadas representam uma parte importante no uso prático da eletricidade sendo que os sistemas elétricos comerciais de potência foram criados inicialmente para essa finalidade.

Além disso, a iluminação representa cerca de 17% (período de ponta) do consumo residencial (19) o que é significativo deste ponto de vista.

A compatibilidade das lâmpadas incandescentes ao uso indiscriminado em corrente contínua ou alternada é um fato conhecido. Por outro lado, o aumento do uso de lâmpadas fluorescentes compactas, devido ao seu maior rendimento luminoso, colocou esse dispositivo em evidência no cenário das instalações em corrente alternada e por isso o estudo de compatibilidade com a corrente contínua é pertinente.

Estudos feitos para determinar modelos representativos de cargas lineares (52) tais como lâmpadas compactas, indicam que algumas delas são alimentadas por um retificador de onda completa em ponte associada a um capacitor de filtro.

Isso implica que uma lâmpada com tensão nominal alternada de 127V entrega aproximadamente 180V de tensão contínua pulsante para a parte ativa da lâmpada, conforme ilustra a figura a seguir.
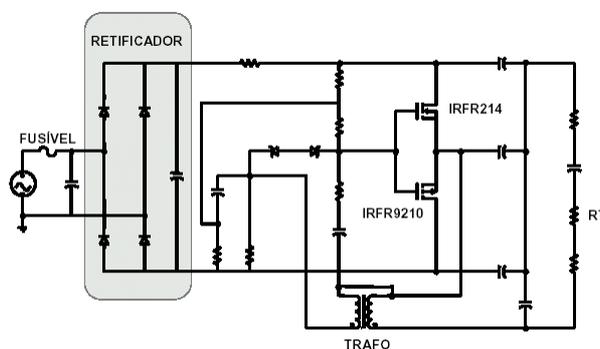
**Figura 6.10 – Circuito simplificado de lâmpada fluorescente compacta, com destaque para o retificador de entrada.**
Fonte: (NDIAYE, 2006).

Esse circuito pode ser alimentado diretamente por uma tensão contínua da ordem de 180V de modo a operar de maneira satisfatória.

Testes apontam que a forma de onda da corrente deste tipo de carga, quando alimentada por tensão alternada é do tipo periódico pulsante, conforme ilustra a figura a seguir.
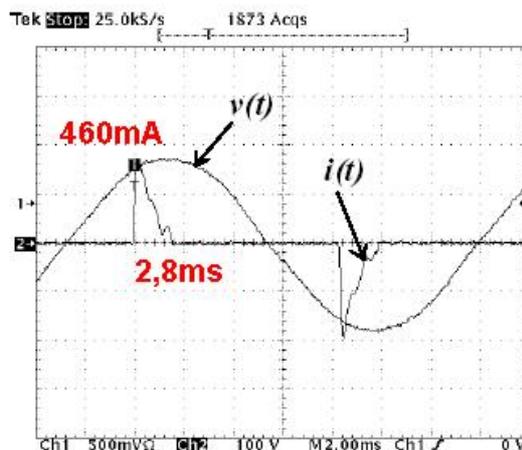
**Figura 6.11. – Forma de onda de corrente em uma lâmpada fluorescente compacta de 15W, alimentada por tensão alternada.**
Fonte: (Autoria própria a partir de NDIAYE, 2006).

Esse tipo de lâmpada apresenta um pico de corrente de aproximadamente 460mA e a largura da base de aproximadamente 2,80ms, a freqüência é de 60 Hz em corrente alternada.

Quando alimentada com tensão contínua com valor aproximado de 163V o valor médio da corrente da lâmpada é 92mA resultando em uma potência de aproximadamente 15W. Existe uma pequena ondulação na tensão e uma grande ondulação na corrente, cujo valor de pico é de aproximadamente 196mA. A figura a seguir ilustra a forma de onda da corrente.
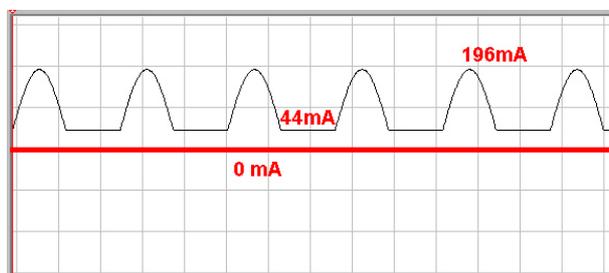
**Figura 6.12. – Forma de onda de corrente em uma lâmpada fluorescente compacta de 15W, alimentada por tensão contínua.**
Fonte: [Autoria própria]

**6.3.2.4. Os veículos elétricos.**

A operação de sistemas que contém o armazenamento de energia por baterias traz consigo as dificuldades técnicas de manutenção inerente a eles. Neste cenário, os veículos elétricos podem contribuir com a rede de energia quando nela estiverem conectados, desde que exista uma infra-estrutura adequada.

Enquanto dispositivos elétricos especializados esses elementos possuem baterias com substancial capacidade de armazenamento e dependendo do modo como operam nas cidades podem passar grande parte do tempo conectado à rede, contribuindo como meio de armazenamento de energia. A manutenção dos sistemas técnicos especializados desses equipamentos seria feita de forma similar ao que se aplica aos veículos atuais em oficinas especializadas, simplificando a operação para o usuário final.

Além disso, o número potencial de dispositivos de armazenamento teria proporções da frota de veículos existentes nas grandes cidades, o que representa um potencial considerável.

Existem muitas configurações possíveis para os sistemas envolvendo fontes alternativas de energia, a rede elétrica da concessionária e os veículos elétricos, mas para que esses últimos possam servir como acumuladores para o sistema é fundamental a existência de uma rede inteligente para coordenar as operações.

No entanto esses objetivos implicam em uma grande mudança das relações de propriedade e da política de apropriação da energia, tanto no nível individual quanto coletivo. A própria mudança física dos sistemas implica em um considerável tempo de transição pelo custo envolvido e disponibilidade de recursos, lembrando que hoje o carro elétrico no Brasil existe somente como objeto de pesquisa.

Embora alguns veículos elétricos menores talvez sejam mais acessíveis sua capacidade de armazenamento não seria suficiente para contribuir substancialmente com a rede elétrica.

## 6.4. Potência máxima de transmissão dos alimentadores

Partindo da premissa de que os equipamentos atuais são bastante flexíveis com respeito à forma de suprimento da rede elétrica em CC ou CA, a escolha pela corrente contínua ou alternada envolve também o estudo comparativo da capacidade alimentador.

Existem dois critérios para definir a potência máxima transmissível em um circuito alimentador em baixa tensão: a capacidade de condução de corrente e a queda de tensão.

Para efeito de comparação a configuração dos circuitos também é significativa e aqui se sugere duas que guardam alguma semelhança.

O ponto em comum a respeito das configurações dos circuitos é a presença de três condutores de mesma seção transversal que podem constituir um alimentador CA trifásico ou CC simétrico, conforme ilustra a Figura 6.13 a seguir.
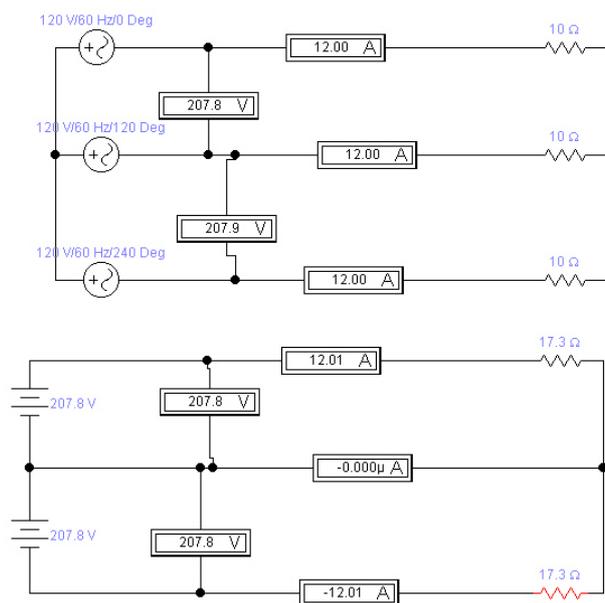
**Figura 6.13. – Circuitos utilizados para comparação dos alimentadores.**
Fonte: [Autoria própria]

O motivo de utilizar essas configurações de circuito é que a primeira representa um circuito trifásico sem neutro, do tipo utilizado em motores e a segunda representa uma fonte de corrente contínua simétrica (+VCC, 0, -VCC) mais adequada à operação de inversores de freqüência do tipo que aciona motores trifásicos de indução. Para simplificar a comparação inicial foi considerada somente a potência ativa, sem demasiado prejuízo para as conclusões.

Iniciando pelo critério da capacidade de condução de corrente é possível comparar os dois circuitos através da relação entre as potências máximas transmissíveis pela linha CA e pela linha CC na configuração descrita.

A potência máxima que uma linha CA, formada por três condutores, pode fornecer para uma dada seção de condutor dada para um alimentador trifásico sem condutor neutro que alimenta um circuito equilibrado é igual a:

$$P_{CA_máx} = \sqrt{3} * U_L * I_L * \cos j \qquad (6.1)$$

Onde $U_L$ é a tensão de linha, $I_L$ é a corrente de linha que para esse cálculo corresponde a corrente nominal do condutor e $cos\ j$ é o fator de potência.

Utilizando a mesma linha alimentada por uma fonte simétrica com tensão contínua e valor igual ao valor eficaz da tensão de linha $U_L$, temos uma potência máxima fornecida igual a:

$$P_{CC_máx} = 2 * U_L * I_L \qquad (6.2)$$

Calculamos a relação das potências máximas, chegando a conclusão que na melhor hipótese (carga com fator de potência unitário) a linha CC tem capacidade 15% maior do que a linha CA, com os mesmos condutores no alimentador.

Se o fator de potência da carga CA for menor a diferença em capacidade é maior em favor da linha CC.

Além disso, o condutor comum da linha CC que corresponde ao neutro pode ter seção reduzida, pois no caso do circuito equilibrado a corrente neste condutor é nula.

O segundo critério para análise é a queda de tensão máxima admissível e depende do comprimento do alimentador.

A relação funcional para estabelecer essa dependência é a impedância por unidade de comprimento que é uma característica básica dos alimentadores cujo valor geralmente não é indicado diretamente nos catálogos dos fabricantes de cabos. O valor indicado normalmente é a queda de tensão sobre o produto do comprimento pela corrente no alimentador que é muito restrito para esse estudo.

Os valores de impedância que fundamentam a análise da queda de tensão também servem como base para a análise dos efeitos da corrente de curto-circuito.

## 6.5. A impedância da linha

O estudo da queda de tensão nas instalações é útil por dois aspectos. O primeiro deles é determinar a máxima potência que pode ser transmitida pelo alimentador sem que ocorra uma queda de tensão excessiva. O segundo aspecto é o dimensionamento da proteção contra os efeitos do curto-circuito na instalação.

Os principais elementos que constituem a impedância utilizada para o cálculo da queda de tensão são a resistência e a indutância dos condutores que constituem os circuitos.

As normas NBR6880 e NBR6252 (53) indicavam a expressão para o cálculo da resistência em função das dimensões físicas dos fios e cabos, da sua construção e do material condutor utilizado:

$$R = \frac{4r_{20}}{npd^2} * k_1 * k_2 * k_3 \quad \left[\frac{\Omega}{m}\right] \qquad (6.3)$$

Onde:

- § $R$ é a resistência em corrente contínua a 20°C;
- § $r_{20}$ é a resistividade padrão a 20°C e vale 17,241 Ω $mm^2$ / km para o cobre e 28,264 Ω $mm^2$ / km para o alumínio;
- § $n$ é o número de fios do condutor;
- § $d$ é o diâmetro nominal dos fios do condutor, em mm;
- § $k_1$ é um fator dependente do diâmetro dos fios no condutor, da natureza do metal e do fato de os fios de cobre serem nus ou revestidos;
- § $k_2$ é um fator de encordoamento dos condutores;
- § $k_3$ é um fator que depende da reunião dos condutores.

| Diâmetro dos fios elementares [mm] | | k1 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Fio sólido ou corda compacta | | Condutores encordoados | |
| | | Cobre nu | Cobre revestido ou alumínio nu | Cobre nu | Cobre revestido ou alumínio nu |
| > | ≤ | | | | |
| - | 0,10 | - | - | 1,07 | 1,12 |
| 0,10 | 0,31 | - | - | 1,04 | 1,07 |
| 0,31 | 0,91 | 1,03 | 1,05 | 1,02 | 1,04 |
| 0,91 | 3,60 | 1,03 | 1,04 | 1,02 | 1,03 |
| 3,60 | - | 1,03 | 1,04 | - | - |

Nota: Revestido significa coberto por uma camada de estanho (condutor estanhado).

| Tipo de encordoamento | Diâmetro do fio elementar [mm] | k2 |
|---|---|---|
| Fio sólido ou corda compacta | - | 1,00 |
| Redondo normal | >0,60 | 1,02 |
| | ≤0,60 | 1,04 |
| Flexíveis | >0,60 | 1,03 |
| | ≤0,60 | 1,04 |

| Forma de reunião | k3 |
|---|---|
| Cabos unipolares ou multipolares com veias paralelas (não torcidos) | 1,00 |
| Cabos multipolares, com veias torcidas (não flexíveis). | 1,02 |
| Cabos multipolares, com veias torcidas (flexíveis). | 1,05 |

Quadro 6.1 – Características dos condutores

A temperatura de operação do cabo também influencia na operação produzindo um aumento da resistência elétrica diretamente proporcional.

O valor da resistência a uma temperatura $q$ de trabalho é dado pela expressão:

$$R_q = R*[1 + a_{20}*(q - 20)] \quad (6.4)$$

Sendo $a_{20}$ = 3,93 x $10^{-3}$ [1/°C] para o cobre ou 4,03 x $10^{-3}$ [1/°C] para o alumínio

Há um acréscimo devido aos efeitos pelicular e de proximidade.

$$R_{CA} = R_q * (1 + Y_s + Y_p) \quad [\Omega / km] \qquad (6.5)$$

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0{,}8 * X_s^4} \qquad (6.6)$$

$$X_s^2 = \frac{8 * p * f}{R_q} * 10^{-4} * k_s \qquad (6.7)$$

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0{,}8 * X_p^4} * \left(\frac{dc}{S}\right)^2 * \left[\frac{0{,}312 * dc^2}{S} + \frac{1{,}18}{\frac{X_p^4}{192 + 0{,}8 * X_p^4} + 0{,}27}\right] \qquad (6.8)$$

$$X_p^2 = \frac{8 * p * f}{R_q} * 10^{-4} * k_p \qquad (6.9)$$

Onde:

- $R_q$ é a resistência a uma temperatura θ de trabalho;
- *Rca* é a resistência devido aos efeitos pelicular e de proximidade;
- *dc* é o diâmetro do condutor, em mm. (*dc*=*dx*= diâmetro de um condutor circular de mesma seção);
- *S* é a distância entre os eixos dos condutores, em mm. (para cabos com condutores setoriais S= dx+2e, sendo e a espessura do isolante em mm);
- $Y_s$ é um fator devido ao efeito pelicular;
- $Y_p$ é um fator devido ao efeito de proximidade;
- $k_s$ e $k_p$ são valores experimentais, muitas vezes tomados iguais a unidade.

Dessa forma podemos determinar a resistência dos fios e cabos que constituem os alimentadores dos circuitos elétricos.

A indutância de um condutor depende de suas características e das distâncias entre os condutores do circuito. Assim, considerando um circuito formado por três cabos unipolares em trifólio, apresenta uma indutância própria, por condutor, desprezando o efeito das ligações nos extremos (54):

$$L = k + 0{,}46 * \ln\left(\frac{2 * S_m}{dc}\right) \text{ [mH/km]} \quad (6.10)$$

Onde:

- *k* é um fator que depende do número de fios do condutor, considerado como sendo 0,056625, em mH/km;
- *dc* é o diâmetro do condutor, em mm.;
- $S_m$ é a distância média geométrica dos condutores, em mm. (para cabos montados em trifólio *S= dc+2*e*, sendo e a espessura do isolante em mm);

Outra consideração importante para este estudo é que para um sistema trifásico simétrico, (geometricamente e eletricamente), esta indutância (por condutor) vai definir a reatância de seqüência positiva, utilizada nos cálculos trifásicos.

Essas expressões permitem calcular o valor da impedância do circuito de corrente alternada trifásica e a do circuito em corrente contínua correspondente, para um circuito formado por condutores circulares retilíneos e paralelos, que é a configuração mais utilizada nas instalações elétricas.

Com esses valores de impedância é possível estimar a capacidade máxima do alimentador através do critério da queda de tensão.

As tabelas a seguir contêm os dados calculados para três condições de corrente representativas para o estudo. A primeira tabela contém os valores válidos para corrente contínua, a segunda alternada em 60Hz e a terceira contém os da freqüência de 30kHz.

O dado da primeira tabela representam a condição de operação com corrente contínua, o da segunda alternada na freqüência industrial.

O dado da terceira tabela procura levar em conta a influência da corrente contínua pulsante de alta freqüência que é observada na entrada dos equipamentos elétricos que operam com fontes do tipo chaveadas, quando alimentados por tensão contínua.

Tabela 6.2– Valores de impedância.para operação em corrente contínua.

| Seção nominal do condutor [mm$^2$] | Resistência por condutor a [ohms/km] | Reatância por condutor [ohms/km] |
|---|---|---|
| 1,5 | 12,43 | 0,00 |
| 2,5 | 7,46 | 0,00 |
| 4 | 4,66 | 0,00 |
| 6 | 3,11 | 0,00 |

Fonte: [Autoria própria]

Tabela 6.3 – Valores de impedância.para operação na freqüência de 60 Hz

| Seção nominal do condutor [mm$^2$] | Resistência por condutor a [ohms/km] | Reatância por condutor [ohms/km] |
|---|---|---|
| 1,5 | 12,43 | 0,10 |
| 2,5 | 7,46 | 0,10 |
| 4 | 4,66 | 0,09 |
| 6 | 3,11 | 0,09 |

Fonte: [Autoria própria]

Tabela 6.4 – Valores de impedância.para operação na freqüência de 30 kHz

| Seção nominal do condutor [mm$^2$] | Resistência por condutor a [ohms/km] | Reatância por condutor [ohms/km] |
|---|---|---|
| 1,5 | 16,94 | 51,01 |
| 2,5 | 13,33 | 49,52 |
| 4 | 11,68 | 46,99 |
| 120 | 7,33 | 40,14 |

Fonte: [Autoria própria]

Os dados dessas tabelas foram calculados para ser utilizados nas comparações entre a linha trifásica equilibrada e sem neutro que opera em corrente alternada com a linha de três fios em corrente contínua. Para isso alguns pontos devem ser observados.

Os valores apresentados nas tabelas foram estimados para um condutor de modo que devem ser multiplicados por dois para os circuitos CC. No caso do circuito trifásico equilibrado esses valores representam a impedância de seqüência positiva e podem ser utilizados da forma como estão, para o cálculo de um circuito equilibrado.

O cálculo da capacidade máxima do condutor a partir do critério da queda de tensão é função da impedância da linha que varia com seu comprimento. Por outro lado, o critério da capacidade de condução máxima não é influenciado por esse parâmetro.

Sobrepondo os dois critérios se obtém uma curva de potência máxima transmissível em função do comprimento da linha. Abaixo de uma certa distância prevalece o critério da capacidade de condução.

O critério da capacidade de condução máxima é definido pelo maior aquecimento admitido pela isolação do cabo em regime normal. Já o critério da queda de tensão depende do maior valor admitido para esse parâmetro.

Para efeito de comparação quatro bitolas de cabos podem ser utilizadas como referência para traçar gráficos comparativos da potência máxima em função da distância 1,5; 2,5; 4 e 6 $mm^2$. A queda de tensão admissível foi definida como 5%. O primeiro gráfico corresponde a linha CA trifásica (60Hz) e o segundo para a linha CC.
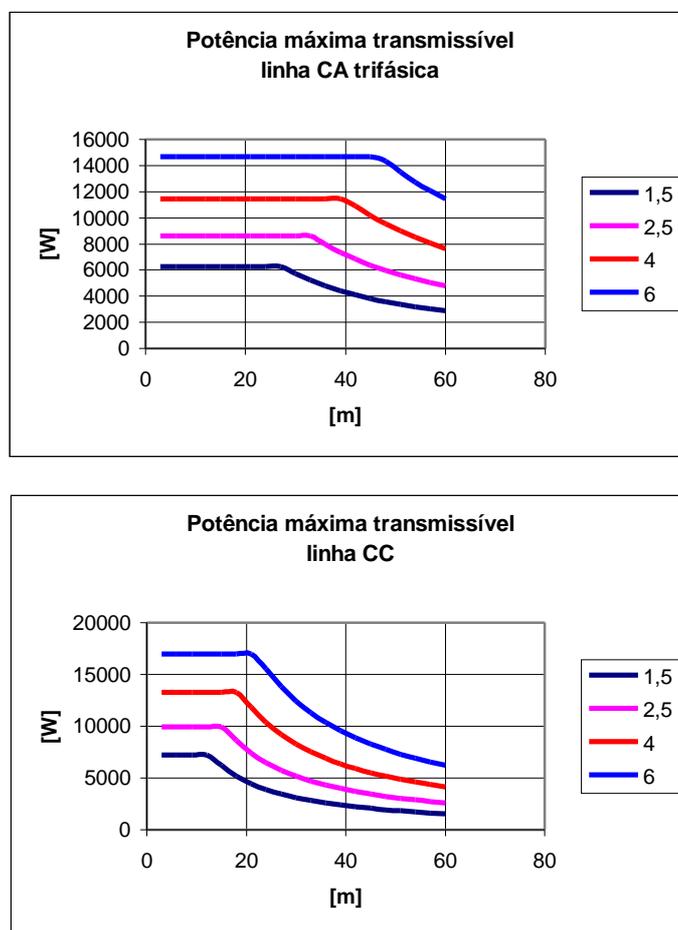
**Figura 6.14 - Comparação da capacidade máxima das linhas CA e CC.**
Fonte: Autoria própria.

Considerando a configuração utilizada para comparar a linha CC a três fios com a CA trifásica, se sabe de antemão que a potência máxima transmissível da primeira é 15% superior a da segunda nos primeiros metros de comprimento, onde prevalece o critério da capacidade de condução de corrente.

Segundo as estimativas à medida que o comprimento da linha progride essa diferença diminui e o padrão inverte em favor da linha trifásica cuja potência máxima transmissível chega a ser o dobro da linha CC.

Dessa forma se conclui que para linhas de comprimento reduzido, onde prevalece o critério da capacidade de condução de corrente a linha CC a três fios tem capacidade superior à linha trifásica com três fios, na configuração adotada para comparação.

Analisando do ponto de vista da seção do condutor, quanto maior o valor desta maior a distância onde prevalece o critério da condução. Dessa forma quanto maior a potência do alimentador e, portanto seu condutor maior à distância que se pode transmitir CC com vantagem em relação a CA.

A vantagem da corrente contínua ocorre nos circuitos terminais com comprimento inferior a 20 metros, o que justifica sua aplicação em circuitos terminais de comprimento reduzido.

Por este ponto de vista, em uma instalação maior formada por várias unidades de porte modesto, como em alguns edifícios residenciais, os circuitos de distribuição poderiam ser feitos em corrente alternada e dentro das unidades os circuitos poderiam ser em corrente contínua, se isso for vantajoso.

Conforme se pode observar das tabelas existe uma grande diferença de valores de impedância para corrente contínua ou em 60 Hz se comparado aos valores correspondentes na freqüência de 30 kHz. Isso é particularmente interessante se consideramos que as fontes chaveadas dos equipamentos operam neste nível de freqüência e, portanto a ondulação da corrente pode produzir uma queda de tensão desfavorável nessa condição.

O problema aqui consiste em determinar qual característica se sobressai (o comportamento em corrente contínua ou as harmônicas mais elevadas) em função das características dos equipamentos. Por exemplo, as medições efetuadas nas lâmpadas fluorescentes compactas apontaram grande contribuição da componente de alta freqüência na corrente, quando alimentadas por uma fonte de tensão contínua, com baixa ondulação, conforme se observa na figura 6.12 (forma de onda da LFC).

Entretanto sabe-se que as modernas fontes que operam em corrente contínua podem regular automaticamente seu ponto de operação e por isso admitem grande variação na tensão, o que em princípio atenuaria o efeito de problemas com a queda de tensão.
Dessa forma se conclui que a possibilidade de utilizar a corrente contínua é limitada aos circuitos terminais de comprimento reduzido em instalações residenciais.

### 6.6. O controle da rede e a proteção dos circuitos

Outro aspecto interessante da operação em corrente contínua é que seu controle em princípio é mais simples se comparado à operação de uma rede em corrente alternada, posto que não há necessidade de contabilizar os componentes reativos em regime permanente.
De modo bastante simplificado o objetivo primário do controle dessa rede CC é alcançado através da estabilidade da tensão do circuito principal. A participação dos geradores no sistema é naturalmente controlada pelo equilíbrio das tensões dos geradores que é função da disponibilidade da fonte de energia primária.
Essa característica é bastante atraente na operação de geradores distribuídos em uma micro-rede, pois mesmo na falha do sistema de controle central, a operação ainda é possível, coordenada pelo nível de tensão, ainda que o sistema não se ajuste no ponto ótimo de operação, o que beneficia a confiabilidade.
Por outro lado as manobras em corrente contínua são mais complicadas devido ao fato de não haver passagem pelo zero, que é uma característica da corrente alternada aproveitada por muitos dispositivos de proteção, tais como disjuntores, chaves, relés, fusíveis, etc.
O semicondutor que forma os circuitos eletrônicos de potência tem uma baixa capacidade térmica e, portanto, pode ser destruído em poucos milésimos de segundo por um aumento rápido e repentino da corrente provocado por um curto-circuito [55]. Os fusíveis normais de baixa tensão, mesmo os mais rápidos, não são adequados para proteção de diodos retificadores e "tiristores" contra os efeitos do curto-circuito. Por isso tipos especiais de fusíveis têm sido desenvolvidos que são descritos como ultra-rápidos ou como fusíveis semicondutores.
As principais causas de curto circuito nos conversores são:

- O curto-circuito da carga ou da linha que a alimenta;

- q O curto-circuito de um diodo retificador ou de um “tiristor” devido à perda de sua capacidade de bloqueio no sentido reverso e
- q No caso de inversores a condução direta devido a uma falha de comutação ou disparo falso.(55)

Se o fusível adequado é conectado em série com cada diodo retificador e cada “tiristor” usado nos braços principais da ponte, os componentes serão protegidos adequadamente.

Atualmente os fusíveis disponíveis para operar com tensão contínua e alta corrente são elementos altamente especializados sendo adquiridos em lotes de fabricantes específicos e o custo associado aos testes é elevado nesses casos.

Isso poderia representar uma barreira para a disseminação da corrente contínua nas instalações, porém o problema pode ser atenuado pela distribuição de circuitos e estratégia de operação que evite ao máximo a atuação da proteção do circuito principal que contém o conversor. O objetivo nesta estratégia é privilegiar a atuação no circuito terminal e por isso a coordenação da proteção deve ser bem avaliada.

Como se projeta que os circuitos terminais, que são alimentados por unidades de saída constituídas de conversores CC/CC para condicionar adequadamente a tensão do barramento principal para ser usada nos utensílios domésticos, é possível juntar a essas unidades circuitos de proteção mais rápidos e eficazes. Os conversores poderiam ter seus parâmetros de atuação ajustados em função dos alimentadores para assegurar a proteção. Exemplo disso é o controlador de nível de luminosidade moderno que monitora a carga na saída e em caso de sobrecarga corta a alimentação do circuito por ele controlado.

Isso não exime o uso de disjuntores nas instalações elétricas, pois a unidade de saída pode apresentar um defeito prejudicial à linha que a alimenta e nesse caso deve haver uma proteção.

O cálculo da corrente de curto circuito terminal pode ser feito com base na resistência da linha, que varia conforme a expressão 6.5 e a tabela 6.2, lembrando que esse valor deve ser multiplicado por dois devido ao fato de ser calculado por condutor.

Independente de se usar corrente contínua ou alternada na instalação elétrica residencial existe o problema de segurança associado às várias fontes que se supõe estarem interligadas pelo barramento principal. No caso de manutenção desta parte da instalação deve se cuidar do desligamento de todas as fontes envolvidas.

### 6.7. O controle automático aplicado às redes domésticas

A eletricidade como forma de energia torna fácil o desenvolvimento de dispositivos automáticos de processamento de informações e controle de modo que outras redes de insumos energéticos operam com o auxílio de dispositivos elétricos.

Dessa forma se espera que a rede de energia elétrica atue como se fosse o sistema nervoso do ponto de vista do aproveitamento energético das instalações.

Existem muitos modos pelo qual a energia elétrica pode contribuir com outros energéticos diretamente, porém a operação inversa muitas vezes não é recomendável.

O princípio a ser adotado é do trabalho cooperativo das fontes e da substituição do serviço prestado por elas. Exemplo disto é a substituição de chuveiros elétricos por similares a gás, pois esse último insumo ao substituir o primeiro libera uma capacidade para o sistema. O serviço prestado pelo energético é o aquecimento de água, ou seja, produção de calor.

O calor é uma forma de energia muito comum nos processos e extremamente aproveitável desde que haja gradientes de temperatura, de modo que se bem aproveitado pode diminuir o consumo das fontes primárias. Por exemplo, uma máquina que produz um trabalho mecânico e dissipa calor pelas perdas pode ser refrigerada por água que pode aproveitar esse calor para prover conforto térmico.

Dependendo do alcance do projeto, pode ser vantajoso retirar a energia elétrica como um recurso energético colateral, quando o uso de energia térmica é intenso. Nesse processo é necessário o planejamento integrado de recursos para o máximo aproveitamento da fonte de energia. As máquinas que convertem energia pela combustão, o fazem com rendimento próprio baixo (próximo a 30%). Mas quando o interesse principal é produzir calor para provera aquecimento, o aproveitamento elétrico seria um efeito colateral desejável ao elevar o rendimento energético do conjunto.

Nas instalações elétricas em países de clima frio o calor produzido pelas máquinas pode ser utilizado nos aquecedores de ambiente, tendo como efeito colateral à produção de eletricidade.

O clima no Brasil geralmente não favorece esta opção nas instalações residenciais, pois a necessidade de aquecer ambiente para prover conforto térmico é menor.

Nas instalações hidráulicas prediais, o trabalho executado para completar o nível da caixa de água pode auxiliar no gerenciamento da energia.

Ao se armazenar água em caixa elevada é acumulada energia potencial gravitacional que será utilizada para movimentar esse fluido na rede hidráulica.

Para bombear a água para a caixa se pode utilizar a energia elétrica da rede ou fornecida por painéis solares. Durante o dia, quando operam os painéis solares, é possível acumular água suficiente para atender a demanda e dessa forma se armazenaria energia de modo eficiente, liberando o sistema para atender outras cargas.

Dessa forma se conclui que a aplicação da automação nas redes elétricas residenciais visa integrar os recursos disponíveis, sejam hidráulicos, térmicos, iluminação e outros de modo a prover os serviços energéticos de modo eficiente.

Na construção física dos sistemas alguns elementos podem ser adquiridos da experiência na automação de plantas industriais, onde os sistemas e comandos elétricos são utilizados para controlar processos físicos diversos.

O princípio básico a ser perseguido é a busca pelo ganho energético dos processos de modo que a automação não deve representar um ônus excessivo ou um fim por si mesma, mas um meio para se obter um benefício. Existe uma tendência a desprezar esse princípio, principalmente nas instalações residenciais, pois a introdução de dispositivos automáticos é um item de conforto que é muito valorizado. Por outro lado o custo do investimento inicial na automação não incentiva o investimento sem que o item conforto seja salientado.

Assim se deduz que as aplicações de automação para residências em um futuro próximo devem salientar o aspecto do conforto e mesmo que a premissa do desempenho seja considerada, efetivamente poderá ser menosprezada.

## 7. CONCLUSÃO

Atualmente a busca pelo melhor desempenho econômico das redes elétricas tem incentivado a evolução das chamadas redes inteligentes.

Como toda rede elétrica, as redes inteligentes agregam funções e automação com vários níveis de complexidade e constituem um sistema muito amplo que une a geração ao consumo. A diferença perceptível pelo consumidor residencial está no fato deste ser incluído na operação dessa rede praticamente em tempo real, ou seja, se espera sua participação mais efetiva no sistema elétrico.

Dessa maneira, através de um dispositivo legal tarifário se espera incentivar o consumidor a agir em consonância com a disponibilidade do sistema e com isso se deduz que haverá uma mudança na forma de aquisição da energia elétrica.

O efeito principal esperado é o deslocamento da demanda para fora dos horários de pico, o que é evidenciado pela chamada tarifa branca. Assim, para que ocorra o efeito pretendido é fundamental a participação do consumidor.

Essa modalidade tarifária, que depende da substituição dos medidores, prevê redução na tarifa em relação à convencional, desde que o consumidor evite os horários de ponta.

A demanda de energia nesses horários reflete o hábito de consumo que é determinado por condições muitas vezes além do controle do consumidor.

O que se pretende é incentivar o consumidor a mudar seu padrão de consumo, não exatamente seus hábitos.

Para que possa haver uma defasagem entre o padrão de consumo e a utilização da energia é necessário que esta seja armazenada nos períodos mais favoráveis para ser utilizada nos momentos de maior necessidade.

Neste caso é fundamental haver dispositivos automáticos que executem as operações técnicas que permitem o armazenamento de energia e seu gerenciamento seguro.

Esses dispositivos de automação podem ser similares aos utilizados na automação de processos industriais.

Por outro lado devido ao custo dos equipamentos destinados à automação, o item conforto muitas vezes se sobrepõe a utilidade básica de modo que a difusão de aplicações domésticas pode ser restrita. Entretanto o estrato da sociedade que possui acesso a esse tipo de recurso consome energia mais intensivamente, de modo que associar o conforto à economia pode ser atraente.

Nesse sentido os fabricantes de equipamentos voltados à automação doméstica desenvolvem seus produtos, para um público mais sofisticado e por isso a complexidade dos sistemas pode limitar a sua penetração entre os consumidores mais conservadores.

Ainda hoje os dispositivos para automação residencial não são difundidos na diversidade das suas possibilidades. Tipicamente se encontram os sensores de luz, os relés de tempo, bóias automáticas, as minuterias, relés de proximidade, etc que fazem parte de um rol de aplicações clássicas.

Os dispositivos que tem possibilidade de operar numa rede informatizada de controle, e que tem possibilidades maiores do que o clássico não é tão difundido.

A compatibilidade entre os produtos oferecidos pelos diversos fabricantes também pode ser um motivo para preocupação por parte dos usuários.

Associado a automação, existem os meios para armazenar energia, que em um sentido mais amplo se pode considerar todos os serviços prestados pela eletricidade no gerenciamento dos sistemas energéticos.

O exemplo da operação de reservatórios de água ilustra um meio de se deslocar a demanda envolvendo a automação do processo, pois se pode armazenar água mais intensivamente nos horários mais favoráveis ao consumo de energia. Nos horários de pico de demanda da energia elétrica, se pode evitar o uso das bombas. Além disso, esse cenário pode tornar atraente o emprego de fontes alternativas de energia, por exemplo, painéis solares poderiam ser utilizados para bombear água nos edifícios durante o dia.

Existem equipamentos que dependem diretamente da eletricidade para exercer sua função, tais como as lâmpadas elétricas, computadores e aparelhos eletrônicos de modo geral.

Para esses equipamentos é necessário armazenar a energia em acumuladores, cuja operação seria complexa para o ambiente residencial, além dos custos associados.

Neste caso os veículos elétricos podem ser uma solução para prover os meios necessários para o gerenciamento de energia.

Devido às muitas variáveis que podem ser consideradas no projeto das instalações elétricas residenciais automatizadas, uma proposta de aplicação pode sistematizar o trabalho.

Na base de tudo isso estão os chamados medidores inteligentes que podem executar funções adicionais em relação aos medidores eletrodinâmicos clássicos que supõe que devam substituir.

Essa tecnologia beneficiada pelos avanços da eletrônica, em particular dos micro-controladores e sistemas de aquisição de dados, depende da aplicação irrepreensível da teoria associada a medição de potência e energia, posto que eles operam na base de algoritmos de computador.

A partir da premissa de que os valores obtidos das medições são confiáveis ainda há que se definir mais precisamente o seu uso prático nos sistemas automáticos tanto do lado da concessionária quanto pelo lado do consumidor. Para isso devem ser desenvolvidos aplicativos amigáveis para servir ao consumidor residencial que permitam que este gerencie corretamente sua instalação elétrica.

Considerando a evolução da eletrônica de potência e suas aplicações residenciais, alguns conceitos relativos as instalações elétricas podem ser revistos.

Um desses conceitos é o uso da corrente contínua como meio de transporte de energia elétrica dentro das edificações.

A corrente alternada utilizada nas instalações elétricas é vantajosa ao considerar que ela predomina no sistema elétrico, sendo entregue ao consumidor final desta forma.

A história mostra que fatores técnicos associados às distâncias das fontes primárias de energia, particularmente a hidráulica, determinaram a preferência pela corrente alternada. Em uma época em que os eletrodomésticos podiam operar indistintamente com corrente alternada ou contínua, pois eram aparelhos de iluminação, motores e aquecedores, a vantagem do transporte a longas distâncias com perdas aceitáveis é uma vantagem considerável.

Com a utilização de equipamentos eletrônicos em maior escala nas residências, tais como, rádios, televisores e mais recentemente computadores e outros, há uma maior demanda em corrente contínua. De fato esses equipamentos são dotados de fontes que convertem a tensão alternada da rede em uma tensão contínua, necessária a operação desses equipamentos.

Essas fontes evoluíram em conjunto com os equipamentos que elas suprem e atualmente tem bom rendimento, boa estabilidade e podem operar de modo bastante flexível.

Um exemplo de tal flexibilidade é a tensão de operação que em alguns casos abrange faixas de 100 a 240V, por exemplo.

Além disso, muitas dessas fontes podem ser alimentadas diretamente por tensão contínua, o que pode ser interessante para determinada aplicação.

Os inversores eletrônicos de freqüência incorporam o ajuste mais fino da velocidade e de parâmetros de partida de motores de indução que são melhores se comparado aos circuitos de comandos elétricos.

Entretanto esses equipamentos eletrônicos influenciam negativamente o fator de potência da carga instalada de modo que a potência consumida para produzir trabalho é menor que a potência aparente drenada da rede.

A correção desse problema pode ser feita por meio de filtros passivos ou ativos. No caso das cargas eletrônicas que produzem harmônicas a melhor solução pode ser o uso de filtros ativos.

Para a correção ativa do fator de potência das instalações são utilizados dispositivos eletrônicos aparentados com as fontes chaveadas, que possuem uma etapa intermediária de corrente contínua.

Se os equipamentos da instalação elétrica pudessem ser alimentados com essa corrente contínua, uma etapa de condicionamento da energia elétrica seria eliminada.

As fontes de energia alternativas, tais como geradores eólicos precisam de uma etapa intermediária em corrente contínua para efeito de sincronização com a rede. Já as células solares geram tensão contínua.

Além disso, muitos equipamentos disponíveis atualmente para operação em corrente alternada, tais como computadores e lâmpadas podem operar praticamente sem modificações em corrente contínua.

Todos esses dispositivos utilizam blocos que operam em corrente contínua de modo que pode ser melhor que eles fossem alimentados dessa forma.

Existe uma pequena vantagem com relação à capacidade de condução de corrente contínua em pequenas distâncias, como aqueles encontrados nos circuitos terminais. A operação de geradores em paralelo é mais fácil em corrente contínua. Os acumuladores operam com tensão contínua e existem conversores CC para CC ou CC para CA que permitem grande flexibilidade de operação das fontes de energia.

Com os recursos da eletrônica de potência e da automação industriais disponíveis atualmente existem muitos modos de se implementar instalações elétricas em corrente contínua para configurações simples ou híbrida com a corrente alternada, mesmo para consumidores residenciais, utilizando os eletrodomésticos já existentes no mercado.

Essas instalações elétricas em corrente contínua deveriam ser ao menos equivalentes às suas similares em corrente alternada, mas com maior flexibilidade de controle e maior confiabilidade no fornecimento de energia.

No quesito de confiabilidade no fornecimento de energia, a questão da segurança é um item importante, posto que nessas instalações haverá mais de uma fonte de energia que deve ser desligada no caso de manutenção ou mesmo de um sinistro (curto ou sobrecarga). Deste modo a coordenação das proteções e os procedimentos de desligamento das instalações devem ser mais bem elaborados.

A questão da segurança é importante tanto para as concessionárias como para os consumidores e suas instalações devem trabalhar de modo coordenado.

No conceito de rede inteligente se propõe que o consumidor forneça energia para a concessionária, mas isso deve ser feito sob a coordenação desta última que é responsável pelas intervenções físicas no sistema.

Isso significa que nos desligamentos da rede executados pela concessionária, os consumidores conectados ao ponto específico da rede não devem fornecer energia. Para isso existem inversores de freqüência que trabalham em sincronismo com a rede e se desligam automaticamente em caso de ausência de tensão.

Dessa forma uma instalação residencial que opera com tensão contínua e com várias fontes pode operar coordenada com a rede da concessionária e no caso de falta de fornecimento pode operar com seus próprios recursos com risco mínimo para o pessoal de manutenção da concessionária. Na improvável hipótese do circuito de tensão contínua ser ligado ao secundário do transformador da concessionária haveria um curto-circuito com atuação da proteção do ramal de entrada do consumidor. Não haveria tensão significativa induzida no lado de média tensão do transformador de distribuição associado.

A conclusão é que existe um interesse manifesto no deslocamento da demanda residencial por energia elétrica com a finalidade de ceifar os picos. Para isso é importante armazenar energia, pois o hábito de consumo nem sempre pode ser modificado. A automação é fundamental, pois os usuários são leigos.

A instalação elétrica deve controlar automaticamente várias fontes de energia de modo coordenado e seguro. É necessária a elaboração de sistemas de controle especialistas e as instalações devem ter a capacidade de operar de maneira autônoma mesmo na falta destes (situação de emergência). Já existem na indústria sistemas e elementos que podem ser utilizados para consolidar a automação no ambiente residencial.

Tudo isso é inútil se não houver um incentivo que compense o investimento e coordenação do sistema para que seja eficaz. Esse incentivo e coordenação dependem da modernização do parque de medidores. A modernização do parque de medidores depende da confiança depositada nesses equipamentos e das suas capacidades instaladas. Não existem procedimentos normalizados, mas muitos experimentos realizados. A solução adotada para cada instalação deve ser feita sob medida e os procedimentos normalizados devem orientar, mas não restringir os projetos. Por isso a atenção aos princípios teóricos que regem a operação correta e segura de uma instalação deve ser intensificada, e assim, com o tempo serão criadas as normas e procedimentos para facilitar e difundir a aplicação de sistemas automáticos integrados em instalações residenciais.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


1. UNITED NATION WORLD COMMISION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED) "**Our common future**", 1987. Disponível em: <upload.wikimedia.org/wikisource/d/d7/Our-common-future.pdf>. Acesso em 7 fev. 2012.

2. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY; "**Grid 2030**: a national vision for electricity's second 100 years". USA, 2003. 46p.

3. DU Xin-Wei; YE Qiang**.** Review of smart grid and its development prospect in sichuan. In: POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE, 2010, China. **Proceedings. APPEEC.** Chengdu, 2010

4. EMANUEL, A. E. **IEEE Standard 1459** : a Long Overdue Document : industrial and commercial power systems, 2003. IEEE Technical Conference: Missouri 2003.

5. FERREIRA, A.B.H. "**Novo dicionário Aurélio-séculoXXI**". Nova Fronteira, 1999.

6. MONTICELLI, A.; GARCIA, A. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. Campinas: Editora da Unicamp, 2003.

7. BRASIL. MINISTÉRIO DA MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2011:** ano base 2010. Rio de Janeiro, 2011.

8. BRASIL. MINISTÉRIO DA MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2008:** ano base 2007. Rio de Janeiro, 2008.

9. SAUER, I.L. et al. **A Reconstrução do Setor Elétrico Brasileiro**. Campo Grande: Ed. UFMS; São Paulo: Paz e Terra, 2003, 300p.

10. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional:** Prodist. ANEEL, 2010. módulo 8

11. MEHL, Ewaldo L.M. **Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/qualidade-energia.pdf>.Acesso em: 28 jan. 2012.

12. FUNDAÇÃO DE PROTEÇÃO E DEFESA DO CONSUMIDOR **Cadastro de reclamações fundamentadas 2010**. São Paulo, PROCON, 2011. 29p.

13. Costa, A.F.S.; ZOTES, L.P. Os impactos da privatização sobre a qualidade dos serviços: o caso de uma distribuidora de energia elétrica In: II SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA , 2005. p.929-939

14. PEANO, C.; PARENTE, V. Análise da adequação do uso do IGP-M no reajuste anual das tarifas de distribuição de eletricidade com foco nas distorções repassadas ao setor. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE REGULAÇÃO DOS SERVIÇOS PÚBLICOS CONCEDIDOS, 2003, Gramado. **Anais.** Gramado , 2003.

15. ZAMBON, Eduardo **Otimização de índices de confiabilidade em redes de distribuição de energia elétrica**. Vitória, 2006. 79p. Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

16. ARAUJO, Antonio Carlos Marques de. **Perdas e inadimplência na atividade de distribuição de energia elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro, 2006. 98p. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

17. PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - **Manual de tarifação da energia elétrica**. Rio de Janeiro :Procel, 2001. 44p.

18. KAMADA, Marcelo Maramatsu; BOEIRA, MarcosVinicius. **Análise de modalidades tarifárias e suas aplicações para smart grids**. Curitiba, 2011. 66p. Monografia (Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

19. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Estrutura tarifária para o serviço de distribuição de energia elétrica:** sinal econômico para baixa tensão l.. Brasília: ANEEL,. 2010. Nota Técnica nº 362/2010-SRE-SRD/ANEEL

20. MALTI,M.G. **Mathematics and physics in engineering**. AIEE Transactions of the, v. 58, p.38-40, Fev. 1939

21. BURINI Jr., Elvo Calixto; CAUVILLA, Pedro R.; SAUER, Ildo Luís. **Análise econômica de alternativas para iluminação**. IEE/USP, 1993.

22. MONIZZA, Giuliano; et al. A futura infra-estrutura das redes inteligente. **Eletricidade Moderna**, ano 39, n.443, p.92-99, fev. 2011.

23. ALMEIDA, Rafael Máximo de Almeida. **Sistema SCADA e aplicação**. Fortaleza, 2009. 68p. Monografia (Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

24. KHAN, H.A.; ZHEN Xu; Iu, H.; SREERAM, V. .Review of technologies and implementation strategies in the area of Smart Grid. In: Power Engineering Conference, 2009**. Proceedings.AUPEC 2009**. Australasian Universities , 2009. p.1-6, 27-30

25. REDEINTELIGENTE.COM; **Medidor inteligente é aposta de elétricas**. Disponível em: < http://www.redeinteligente.com/2011/09/08/medidor-inteligente-de-energia-e-aposta-de-eletricas/>. Acesso em: 30 jan. 2012.

26. SANTOS, L.F.; PEREIRA, M. Uma abordagem prática do IEC61850 para automação, proteção e controle de subestações. 2003. VII SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 7., 2007, Salvador. **Anais.VII SIMPASE**. Salvador, 2007.

27. MORENO, H; et al. Guia o setor elétrico de normas brasileiras NBR5410-NBR14039-NBR5419-NR10. **O Setor Elétrico**, Atitude Editorial, p.405, 2011. Edição especial.

28. KASSATKIN, A. S. **Fundamentos da Electrotecnia**. URSS: Mir, 1980.

29. GRAY, A.; WALLACE, G.A. "**Principles and practice of electrical engineering**". Nova York: McGrall-Hill, 1940.

30. EICHELBERGER, R.; OLIVEIRA, R.H; KASSICK, ENIO. Cargas lineares e não lineares: impactos sobre a tensão e a corrente. **Eletricidade Moderna**, ano 37, n.423, p.154-165, jun. 2009.

31. SOUZA, Fabiana Pöttker de. **Correção do fator de potência para instalações de baixa potência empregando filtros ativos** Florianópolis, 2000. 226p. Tese

(Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

32. EDMINISTER, J.A. “**Circuitos elétricos**”. Aparecida: McGraw-Hill, 1971. p.347-348.

33. ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; **Resolução n° 414 de 9 de setembro de 2010**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br /cedoc/ren2010414.pdf>. Acesso em 31 jan. 2012.

34. YOKOGAWA; **Yokogawa measuring instruments**. Japan, 1990. p.195-212.

35. YOKOGAWA; **Yokogawa measuring instruments**. Japan, 1999. p.282-311.

36. FUCHS, A.; GAFINI, H. **A solid state time-division multiplier**. Annales de l’Association internationale pour le Calcul analogique , n° 3,. p.138-142,. Jul. ,1962

37. RODRIGUES, José Eduardo. **Interferência de harmônicas em equipamentos de medição de energia elétrica**. São Paulo, 2009. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

38. ACTARIS; “**Medidores Polifásicos MV & MY**”. Campinas, 2002. p.4.

39. BERTONI, J.H.; Experiência brasileira: motivações, objetivos, dificuldades, ganhos esperados e já alcançados. In**: SEMINÁRIO INTERNACIONAL – MEDIÇÃO ELETRÔNICA**. Brasília: **ANEEL**, 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br /Arquivos/PDF/ELETROPAULO-Jose_Bertoni.pdf>. Acesso em 1 fev. 2012.

40. GERWEN, Rob van; SASKIA, Jaarsma; WILHITE, Rob.; “**Smart metering**”. Holanda. Jul. 2006. Disponível em: <http://www.leonardo-energy.org /webfm_send/435>. Acesso em 1 fev. 2012.

41. ROCHAS, Ana Flávia. Evolução das redes. **Revista GTD energia elétrica**, ano 4, ed.28, p.38-43, nov./dez. 2008.

42. PORTLAND ENERGY CONSERVATION INC. (PECI); **Energy management systems: a practical guide. O&M best practices series**”.p.5-13. Disponível em:

<http://www.scribd.com/doc/51532674/PECI-PracticalGuide1-302> - Out. 1997. Acesso em 01 fev. 2012.

43. PRATSCH, L. W. Automated Energy Management for New & Existing Homes. SEMINÁRIO INTERNACIONAL AUTOMATED HOME MANAGEMENT EXPERT MEETING". Denver, Colorado. , EUA, 1 Out.. 2009. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/buildings/building_america/ahem_expert_mtg.html>. Acesso em 2 fev. 2012.

44. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60439-1;** Conjunto de manobra e controle de baixa tensão. Parte1: Conjuntos com ensaios de tipo totalmente testados (TTA) e conjunto com ensaios de tipo parcialmente testados (PTTA). Rio de Janeiro, 2003. 76p.

45. AGUSTONI, A.; et al**.** Proposal for a high quality DC network with distributed generation, 2003. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 17 . 2003, Barcelona. Proceedings. Barcelona, 2003.

46. ENGELEN, KRISTOF et al . The feasibility of small-scale residential DC distribution systems**.** In**:** IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS**,** 2006**. Annual Conferente IECON2006** .

47. VISENTAINER, Benedicto Luiz. **Fontes de alimentação lineares chaveadas**. São Paulo: Eltec, 1994. 37p.

48. PALMA, Guilherme Rebouças da. **Eletrônica de potência**. São Paulo: Érica, 1994, 259p.

49. ZHAO, Yiqing. **Single phase power factor correction circuit with wide output voltage range**. Blacksburg, 1998. 110p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1998.

50. HUBER,L.; JANG, Y.; JOVANOVIC, M.M.; Performance Evaluation of Bridgeless PCF Boost Rectifiers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n° 3, Mai. 2008.

51. MUSAVI, F.; EBERLE, W.; DUNFORD, W.G.; **Efficiency evaluation of single-phase solutions for AC-DC PFC boost converters for plug-in hybrid electric vehicule battery charges.**

52. NDIAYE, Mamour Sop **Modelagem de cargas não-lineares por fontes de corrente sincronizadas**. Rio de Janeiro, 2006. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, Rio de Janeiro, 2006.
53. COTRIM, Ademaro. **Manual de Instalações Elétricas**. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985. p.64-67.

54. MIRANDA, Reis. **Instalações Elétriccas Industriais**. São Paulo: Edição do autor, 1994. p.4-3.

55. SEMIKRON; **Power semiconductor handbook**. Hertfordshire, England 1980. 276p.

56. MUSSOI, F.L.R. **Sinais Senoidais:** tensão e corrente alternadas. 3.ed. Florianópolis: CEFET/SC, 2006, p.126.

57. TRINDADE, R. H. L. "Estudo das características de baterias recarregáveis possíveis de serem utilizadas no projeto Satélite Universitário. In 12° ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA – XII ENCITA". São José dos Campos, SP. , Brasil, 16 a 19 Out.. 2006. Disponível em: <http://www.bibli.ita/xiiencita/ELE-12.pdf>. Acesso em 2 fev. 2012.